

SIMULATION DER TROCKNUNG GESTRICHENER PAPIERE

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Miklos Kanzamar

aus Senta

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M.J. Hampe

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. S. Schabel

Tag der Einreichung: 30.04.2004

Tag der mündlichen Prüfung: 07.07.2004

Darmstadt 2004

D17

Danksagung

Danke...

Prof. Manfred Hampe, Prof. Samuel Schabel, Prof. Werner Kast, Dr. Trefz, Dr. Rüdiger Kurtz, Dr. Martin Tietz, Knut Helmer, Denis Partheymüller, Uwe Fröhlich, Herr Gottwald, Herr Palinkas, Frank, Rolf, Herr Schwäble, Herr Fischer, Herr Vekony, Herr Dörflinger, J. Christian Lamprecht, Markus Wiese, Silke Zimmer, Peter Zimmer, Dr. Berger, Stefan Wittmer, Berk Kermen, Benjamin Böhm, Alper Zoroglu, Can Yalçın, Matthias Marx, Matias Daun, Sylvia Mohr-Bimmel, Frau Erbeltinger, Dr. Mendez, Lidia Querling, Michael Hage, Dorothee Kempf, Michael Scharf, Marco Scheuermann, Lars Schneider, Manuela Otto, Karsten Dressbach, Karsten Disser, Lauri Stemmler, Stefan Scharf, Markus Wolf, Dr. Richard Aust, VESTRA-Mannschaft, Jean-Pierre Maume, Anette Wollenhaupt, Marcus Grün, Oliver Conen, Cristopher Mack, Henning Fink, Daniela Geisbüsch, Clemens Elliger, James Kayembe, Oliver Heller, Jörn Buhn, Oliver Scholl, Susanne Wolf, Dirk Sauer, Sven Linow, Andreas Kempf, Jesus Contreras Espada, Herbert Klan, Herbert Edel, Axel Rodenhäuser, Dieter Meier, Michael Düsing, Roland Berntheisel, Yong He, Tekin, Mehmet, Jan Holger Sprute, Vlad Patroushev, Franz Knopf, Edith Linow, Gabriella Weinand, Lörinczi Éva, Iván Ákos, Elvira Grau, Herr Krumbacher, Herr Freundsuh, Oliver Rudolph, Tracy McFayden, Herr Kuchinke, Herr Reich, Stevan Lomić, Herr Eckl, Michael Plattl, Uwe Sonntag, Michael Rudat, Michael Voss, Herr Tadjbach, Nemes Bea, Oliver Pacha, Jürgen Mittag, Thomas Ischdonat, Robert Wolf, Herr Riepenhausen, Herr Grüne, Dr. Guldenberg, Dr. Magnus Pettersson

... und den Firmen...

Voith Paper, Stora Enso Kabel, VESTRA, Perlen Papier, UPM Kymmene Kaukas, Centre Technique du Papier, LOT Oriel, Krieger, Imerys, Polymer Latex, BASF

... für...

An- und aufregende Diskussionen, eine großzügige Unterstützung, Vertrauen, Freiheit, Geduld, fachliches Können und Engagement, Hilfe und moralische Unterstützung in geraden und krummen Lebenslagen, Verständnis, Sinn für Humor, Ansporn, konstruktive Kritik usw.

Ein besonderer Dank geht an meine Frau Ariane Greb-Kanzamar für ihre Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Eidesstattliche Erklärung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Nomenklatur	vi
Abkürzungen	x
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Prozess der Streichveredelung	3
2.1.1 Streichfarbe	5
2.1.2 Runability	6
2.2 Arten des gestrichenen Papiers	7
2.3 Trocknung von gestrichenem Papier	8
2.3.1 Struktur des Trocknungssegments von Streichmaschinen	8
2.3.2 IR-Trockner	9
2.3.3 Heißlufttrockner	11
2.3.4 Zylindertrockner	12
3 Berechnungsmodell	14
3.1 Allgemeine Bilanzgleichungen	19
3.2 Wärmeübertragung	22
3.2.1 Enthalpiebilanz	23
3.2.2 Thermische Anfangsbedingung	29
3.2.3 Konvektive Wärmeübertragung	30
3.2.3.1 Freie Züge	32
3.2.3.2 Kanalströmung in IR-Modulen	34
3.2.3.3 Konvektionstrockner	35
3.2.3.4 Bestimmung der Korrelationsparameter für die Wärmeübertragung in Konvektionstrocknern	38
3.2.4 Wärmeübertragung durch Strahlung	48

3.2.5 Kontakt-Wärmeübertragung	51
3.3 Stofftransport	52
3.3.1 Struktur des gestrichenen Papiers	53
3.3.2 Massenbilanz	55
3.3.3 Penetration	59
3.3.3.1 Die Lucas-Washburn-Gleichung	60
3.3.3.2 Mathematisches Modell der Penetration	64
3.3.4 Verdunstung von einer feuchten Oberfläche	76
3.3.5 Verschließen der Strichoberfläche	79
3.3.6 Verdunstung durch poröse Medien	80
3.4 Wechselwirkung von Wärme- und Stofftransport bei hohen Massenströmen	85
3.5 Stoffeigenschaften	95
3.5.1 Stoffwerte der Luft	95
3.5.2 Wasser und Wasserdampf	97
3.5.3 Rohpapier	99
3.5.4 Strich und Serum	104
 4 Messmethoden zur Bestimmung von Prozessparametern	 106
4.1 Penetration	106
4.1.1 Die klassische Scrape-Off-Methode	107
4.1.2 Soft Scrape	109
4.1.3 Penetrationstiefe	112
4.1.4 SoftScrape-Spuren	116
4.1.5 Ergebnisse	120
4.1.5.1 Abhängigkeit der Penetration von Strichgewicht und Bahngeschwindigkeit	121
4.1.5.2 Abhängigkeit der Penetration vom Feststoffgehalt der Streichfarbe	124
4.1.5.3 Zusammenfassung der Messergebnisse für Penetration	127
4.2 Immobilisierungspunkt der Streichfarbe	129
4.3 Serum – Gewinnung und Viskosität	131

4.4 Vergleich der Trocknungskinetik unterschiedlicher Streichfarben	132
4.5 Temperatur und Feuchte	136
5 Experimentelle Erfassung und Simulation von Streichmaschinen	137
5.1 Validierungsversuche an Pilotmaschinen	138
5.2 Versuche an Produktionsmaschinen	141
5.3 Struktur der Simulation	142
5.4 Simulation von Pilotstreichmaschinen	147
5.4.1 Versuchsstreichmaschine VSM2 – Einzelstrich einseitig	147
5.4.2 Versuchsstreichmaschine VSM1 – Einzelstrich doppelseitig	149
5.5 Simulation von Produktionsmaschinen	153
5.5.1 Kaukas OMC1	153
5.5.2 Perlen PM4	157
6 Kritische Analyse der Simulation	161
6.1 Verlaufsanalyse der Bahntemperatur	163
6.2 Sensitivitätsanalyse	166
6.2.1 Parameter mit geringem Einfluss auf die Trocknung	166
6.2.2 Parameter die den Temperaturverlauf beeinflussen	167
6.2.3 Parameter die den Temperaturverlauf und die Endfeuchte der Papierbahn beeinflussen	172
7 Zusammenfassung	176
8 Literaturverzeichnis	179

Nomenklatur

a	Absorptivität (Strahlung), allgemeine Variable	
α	Temperaturleitfähigkeit	$[\text{m}^2/\text{s}]$
A	allgemeine Variable	
B	Koeffizient in der Stoffübertragung	
c	spezifische Wärmekapazität	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
c	Koeffizient in der Stoffübertragung	
c	Konzentration	$[\text{mol}/\text{mol}]$
c_f	Widerstandsbeiwert	
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
C	allgemeine Konstante	
C_β	Hemmkonstante der Stoffübertragung	
D	Durchmesser	$[\text{m}]$
D	Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2/\text{s}]$
f	Hilfsfunktion (Grenzschichtbetrachtungen)	
FG	Feststoffgehalt	$[\%]$
g	Erdbeschleunigung	$[\text{m}^2/\text{s}]$
h	Enthalpie	$[\text{J}/\text{kg}]$
H	Höhe	$[\text{m}]$
h	Enthalpie	$[\text{J}/\text{kg}]$
ΔH	Enthalpie der Phasenumwandlung	$[\text{J}/\text{kg}]$
ΔH_v	Verdampfungsenthalpie	$[\text{J}/\text{kg}]$
ΔH_{sorp}	Sorptionsenthalpie	$[\text{J}/\text{kg}]$
J	Flux	
K	Anzahl der Komponenten	
L	Länge, Dicke	$[\text{m}]$
Le	Lewis-Zahl	
m	Flächengewicht	$[\text{kg}/\text{m}^2]$
m	allg. Exponent	
\dot{m}	Massenstrom	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$
n	allg. Exponent	

Nu	Nusselt-Zahl	
p	allg. Exponent	
p, P	Druck	[Pa]
P_v	Partialdruck des Wasserdampf	
Pr	Prandtl-Zahl	
\dot{q}	Wärmestromdichte	[W/m ²]
Q	flächenbezogene Wärme	[J/m ²]
r	Reflektivität	
R	Radius	[m]
Re	Reynolds-Zahl	
S	Entropie	[J/K]
Sc	Schmidt-Zahl	
Sh	Sherwood-Zahl	
St	Stanton-Zahl	
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[°C, K]
u	Innere Energie	[J]
V	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
V	Volumen	[m ³]
W	Bahngeschwindigkeit	[m/s]
x	Koordinate in Längsrichtung	
X	Materialfeuchte	[kg/kg]
y	Laufvariable der Integration	

Griechische Symbole

α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² K)]
α^*	α bei hohen Massenströmen	[W/(m ² K)]
α	dimensionslose Konstante	
β	Stoffübertragungskoeffizient	[m/s]
β^*	β bei hohen Massenströmen	[m/s]

β	dimensionslose Konstante	
ε	Porosität, Emissionskoeffizient	
Φ	allg. Profilvariable (Grenzschicht)	
Λ	allg. Kennzahl (Grenzschicht)	
η	dynamische Viskosität, Wirkungsgrad	[kg/(ms)]
μ	chemisches Potential	[J/mol]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
Ω	Oberfläche	
ρ	Dichte	[kg/m ³]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]
σ	Strahlungskonstante	[W/(m ² K ⁴)]
σ	Oberflächenspannung	[N/m]
σ	Quellterm	
θ	Benetzungswinkel	[°]
ξ	dimensionsloser Längenmaß	

Indizes

<i>0</i>	Anfangszustand
<i>1</i>	Endzustand
<i>a</i>	allgemeine Variable
<i>air</i>	Luft, Trocknungsluft
<i>BL</i>	Grenzschicht (boundary layer)
<i>bulk</i>	Bulkphase
<i>cal</i>	berechnet (calculated)
<i>cell</i>	Faseranteil
<i>cont</i>	Kontakt
<i>conv</i>	Konvektion
<i>C</i>	Strich (coating)
<i>CP</i>	gestrichenes Papier (coated paper)
<i>cr</i>	kritisch

<i>CS</i>	Zylinderoberfläche (can surface)
<i>dP</i>	trockenes Papier (dry paper)
<i>dry</i>	trocken, Trockenmasse
<i>e</i>	Energie
<i>em</i>	Emitter, ausgestrahlt
<i>ev</i>	Verdunstung (evaporation)
<i>exp</i>	experimental
<i>front</i>	Trocknungsfront
<i>geo</i>	geometrisch
<i>h</i>	hydraulisch
<i>i</i>	allg. Zähler
<i>IR</i>	Infrarot
<i>k</i>	Komponente <i>k</i>
<i>lam</i>	laminar
<i>m</i>	mittel, gemittelt
<i>max</i>	maximal
<i>mP</i>	feuchtes Papier (moist paper)
<i>moist</i>	feucht
<i>noz</i>	Düse (nozzle)
<i>P</i>	Rohpapier (paper)
<i>pan</i>	Trocknungsschale
<i>pen</i>	Penetration
<i>phc</i>	Phasenwechsel (phase change)
<i>plat</i>	ebene Platte
<i>por</i>	poröses Medium
<i>PZ</i>	Penetrationszone im Rohpapier
<i>q</i>	Wärme
<i>s</i>	Entropie
<i>sorp</i>	Sorption
<i>sur</i>	Oberfläche (surface)
<i>turb</i>	turbulent
<i>V</i>	Wasserdampf (vapour)
<i>visc</i>	viskos
<i>water</i>	Wasser

Abkürzungen

HF	holzfrei
HH	holzhaltig
IR	infrarot
LWC	light weight coated paper
MWC	medium weight coated paper
otro	ofentrocken

1 Einleitung

Ein Papiermacher würde sagen, dass Papier ein Verbund aus Einzelfasern ist, der als Beschreib- oder Bedruckstoff, zum Verpacken oder zu Hygienezwecken genutzt wird. Es gibt Recyclingpapiere aus Altpapier, holzfreie Papiere auf Zellstoffbasis, hadernhaltige Papiere, deren Rohstoffe textilen Ursprungs sind und eine Vielzahl weiterer Sorten aus den verschiedensten Materialien.

Wir leben mit Papier und nehmen es doch kaum aktiv wahr: Ein schweres Papier verursacht andere Geräusche als ein leichtes. Ein raues Papier vermittelt ein anderes Gefühl als ein glattes. Achten wir beim Lesen eines Buches auf das Geräusch, das die Seiten beim Blättern verursachen? Spüren wir, wenn wir einen Prospekt in den Händen halten, ob das Papier, auf dem er gedruckt ist, griffig oder glatt ist? Wir nehmen diese Dinge in der Regel nur unbewusst wahr. So oder so haben sie einen Einfluss auf uns. Man wäre schlecht beraten, würde man für den Prospekt eines Federbettenherstellers einen schweren Karton nehmen. Stattdessen wäre ein Blatt Florpostpapier mit einem Slogan über Leichtigkeit durchaus denkbar. Was für ein Gefühl hätte man als Leser, wenn eine Tageszeitung wie die Frankfurter Allgemeine Zeitung plötzlich auf Kunstdruckpapier erschiene? Papier, Schrift, Satzspiegel, Durchschuss, Farbe und Abbildungen beeinflussen sich wechselseitig. Schrift und Papier können Assoziationen und Gefühle hervorrufen, die die Botschaft stützen oder ihr entgegenwirken. Es gibt kein neutrales Papier, ebenso wenig wie es neutrale Schrift gibt. [Leu00]

Gerade in der Zeit des Internet hat der Bedarf an Drucksachen und besonderen Papieren zugenommen. Der Siegeszug der elektronischen Medien geht mit weltweiter Standardisierung, identischer Vervielfältigung und körperloser Flüchtigkeit einher. Und gerade deswegen entsteht ein neues Bedürfnis nach dem Besonderen, dem „Begreifbaren“, dem Individuellen. [Pit00]

Eine der Möglichkeiten, Papiere besonderer Qualität herzustellen, liegt in der Veredelung durch Streichen: Auf das Rohpapier wird eine gleichmäßige dünne Schicht von Streichfarbe aufgetragen. Die Streichfarbe ist eine Suspension aus Pigmenten, Bindemitteln, Konditionierungsmitteln und Wasser als Dispergierungsmittel. Das mit der Streichfarbe in das System eingebrachte Wasser wird nach dem Strichauftrag im Trocknungsabschnitt der Streichmaschine bis auf eine Restfeuchte entfernt.

Das Einhalten einer hohen Produktqualität gekoppelt mit hoher Wirtschaftlichkeit erfordert die Optimierung des gesamten Herstellungsprozesses. Ziel der hier vorliegenden Forschungsarbeit ist es, ein detailliertes Verständnis der physikalischen Grundlagen der Trocknung gestrichener Papiere zu entwickeln. Der hier behandelte Trocknungsvorgang findet zwischen dem Strichauftrag und der Aufrollung von gestrichenem Papier statt. Das entstehende Wissen in Form eines physikalisch begründeten Modellsystems soll eine Simulation der Trocknung in Pilot- und Produktionsmaschinen ermöglichen.

2 Grundlagen

Im Prozess der Streichveredelung wird auf das Rohpapier eine dünne Schicht an Streichfarbe aufgetragen. Die so entstandene Strichschicht stellt eine feinkörnige und feinporige Oberfläche dar. Das Streichen erhöht die Qualität des Papiers, die durch Eigenschaften wie optische Erscheinung, Glanz, Glätte und gute Bedruckbarkeit geprägt wird [Mäe93, Leh00].

Obwohl durch Streichveredelung die Qualität von Papierprodukten deutlich erhöht werden kann, muss an dieser Stelle auf die Bedeutung des Rohpapiers hingewiesen werden. Die Eigenschaften des Rohpapiers sind entscheidend für die Qualitätsmerkmale des Endprodukts. Die Anforderungen für die Qualität des Rohpapiers sind

- gute Formation (gleichmäßige Massenverteilung),
- gute optische Eigenschaften (Glanz, Weiße und Opazität),
- gute Runnability in der Streichmaschine (hohe Festigkeit, wenig Fehlstellen wie z. B. Löcher),
- gute Aufnahmefähigkeit für die Streichfarbe und
- guter Holdout (die aufgetragene Streichfarbe versackt nicht im Rohpapier – sie bleibt auf der Papieroberfläche).

2.1 Prozess der Streichveredelung

Die Herstellung von gestrichenem Papier erfolgt in drei Phasen: Strichauftrag, Trocknung und Finishing (üblicherweise Kalandern).

Streichmaschinen können online geführt werden, direkt im Anschluss an eine Papiermaschine oder als Offline-Maschinen mit einer Auf- und Abrollung als Zwischenstufe.

Die Auftragung der Streichfarbe auf das Rohpapier erfolgt im Coater. Die bedeutendsten zur Zeit eingesetzten Streichaggregate sind der Blade-Coater und die Filmpresse. In ihnen wird eine Strichschicht ein- oder beidseitig aufgetragen. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Coater mit dazwischen erfolgender Trocknung kann man Mehrfachstriche erzielen. Meistens beschränkt sich die Anzahl der Strichschichten auf jeweils zwei pro Papierseite (Doppelstrich).

Nach dem Strichauftrag muss die gestrichene Papierbahn getrocknet werden. Am Anfang der Trocknungsstrecke steht oft ein elektrischer oder gasbeheizter Infrarotstrahler. Seine Aufgabe ist die schnelle Aufwärmung der Bahn. Darauf folgt in der Regel mindestens ein Lufttrockner, der eine Verfestigung (Immobilisierung) der Streichfarbe bewirken soll. Die nun berührfähig gewordene, gestrichene Oberfläche darf fortan mit Leitwalzen und Trocknungszyindern in Kontakt kommen. In der Trockenzylinderpartie wird die Bahnfeuchte auf das erwünschte Endniveau eingestellt.

Nach der letzten Streichsequenz kann die Bahn entweder aufgerollt oder direkt in ein Glättwerk geführt werden. Das Glätten erfolgt meistens in Super- oder Softkalandern, wodurch Glanz und Glätte des Produkts eingestellt werden. Andererseits nehmen dabei Qualitätsmerkmale wie Dicke, Steifigkeit und Porosität ab [Leh00, Wal93].

2.1.1 Streichfarbe

Streichfarben sind in der Regel wässrige Dispersionen, deren Hauptkomponente mineralische Pigmente sind. Die am häufigsten eingesetzten Pigmente sind fein gemahlenes Calciumcarbonat (CaCO_3), Kaolin, Talkum und Titandioxid (TiO_2) mit Korngrößen im μm -Bereich. Der Pigmentanteil im trockenen Strich beträgt etwa 80 bis 95 Gewichtsprozent. Der Rest besteht aus Bindemitteln und Additiven.

Der Anteil des Wassers in der Streichfarbe wird aus wirtschaftlicher Erwägung so niedrig wie möglich gehalten. Zusätzliches Wasser erhöht die notwendige Trocknerkapazität und die Produktionskosten. Zu wenig Wasser bewirkt andererseits ungünstige Fließeigenschaften, was bei der Strichauftragung Probleme verursachen kann. Die obere Grenze für den Feststoffgehalt liegt bei etwa 70 Gewichtsprozent.

Eine zweite Hauptkomponente von Streichfarben ist der Binder. Die Aufgabe des Bindemittels ist das Verbinden der Pigmentpartikeln untereinander und die Befestigung des Striches auf dem Trägermaterial. Der Anteil des Binders in der Streichfarbe beträgt etwa 5 bis 20 Gewichtsprozent bezogen auf das Gewicht des trockenen Pigments. In der heutigen Zeit werden überwiegend synthetische Binder (z. B. Latex) eingesetzt, aber auch Stärke, oder ihre Kombination.

Für die Einstellung der Viskosität werden der Streichfarbe Verdicker zugesetzt. Dadurch wird auch die Wasserretention beeinflusst. Weist der Verdicker Bindereigenschaften auf, so wird er in diesem Fall Co-Binder genannt. Verdicker sind synthetische oder natürliche Polymere und werden in geringen Mengen dosiert.

Zusätzlich enthält die Streichfarbe wenige Prozent diverser Additive, wie z. B.

- Dispergierungsmittel,
- pH-Modifikatoren,
- Schmiermittel,
- optische Aufheller und zusätzliche Farbstoffe,
- Schaum-Inhibitoren oder
- Biozide.

2.1.2 Runnability

Die fortlaufende Entwicklung von Streichmaschinen ermöglicht immer höhere Bahngeschwindigkeiten bei der Produktion von gestrichenem Papier. Maschinen mit einer Betriebsgeschwindigkeit von 1500 m/min oder mehr sind zum Standard geworden. Einige Pilotmaschinen werden sogar mit bis zu 3000 m/min betrieben [CER01, KCL03]. Es ist zu erwarten, dass diese hohen Geschwindigkeiten in absehbarer Zeit von der Produktion übernommen werden. Außerdem fordert die Bestrebung, Streichfarben mit immer höherem Feststoffgehalt einzusetzen, einen erhöhten Aufwand beim Bewahren einer guten Runnability.

Runnability ist die Lauffähigkeit eines bestimmten Produkts auf einer bestimmten Maschine, ein wichtiger Faktor für eine ökonomische und effiziente Produktion. Sie ist die Eigenschaft von Material und Maschine, eine weitgehend störungsfreie Produktion bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des erwünschten Qualitätsniveaus zuzulassen. Eine schlechte Runnability würde z. B. eine Produktion voller Bahnabrisse und Streichfehler bedeuten.

Die Runnability von Streichfarben wird durch folgende Faktoren beeinflusst [Leh00]:

- Feststoffgehalt, Rheologie und Wasserretention der Streichfarbe,
- Art der Strichauftragung (Coater, Geschwindigkeit) und
- Eigenschaften des Rohpapiers (Porosität, Rauigkeit, Leimung, Nassfestigkeit).

Zuverlässige Labor- oder Simulationsmethoden für die Runnability-Vorhersage gibt es zur Zeit noch nicht. Daher muss bei der Entwicklung einer neuen Streichfarbe ihre Lauffähigkeit an Pilotmaschinen überprüft werden. Dadurch können die Bedingungen in der Produktion näherungsweise berücksichtigt werden.

2.2 Arten von gestrichenem Papier

Die gestrichenen Papiere kann man je nach Beschaffenheit des Rohpapiers in holzhaltige (HH) und holzfreie (HF) Produkte unterteilen. Das Rohpapier des holzhaltigen Produkts wird überwiegend aus Altpapier oder Holzstoff hergestellt, holzfreie Sorten beinhalten davon höchstens 5 %. Letztere bestehen hauptsächlich aus gebleichtem Zellstoff.

Typische holzhaltige Papiere gehören zu den Klassen LWC (Light Weight Coated) and MWC (Medium-Weight Coated), je nach dem aufgetragenen Strichgewicht. LWC-Papiere haben dabei die größte wirtschaftliche Bedeutung, mit Hauptanwendungen im Bereich Zeitschriften, Broschüren und Kataloge.

Holzfreie Papiere werden vorrangig für Produkte höherer Qualität eingesetzt und ermöglichen ein ausgezeichnetes Druckbild. Die hohe Qualität erreicht man meist durch mehrfaches Streichen mit hochwertigen Streichfarben. Holzfreie gestrichene Papiere werden überall dort angewandt, wo eine sehr hohe Druckqualität erforderlich und der Preis des Produkts zweitrangig ist [Mäe93, Leh00], z. B. bei Hochglanz-Katalogen, Kunstdrucken etc.

2.3 Trocknung von gestrichenem Papier

2.3.1 Struktur des Trocknungssegments von Streichmaschinen

Die Trocknung von gestrichenem Papier in der Streichmaschine vollzieht sich durch die Elemente Infrarot (IR)-, Luft- und Zylindertrocknung, für gewöhnlich in der genannten Reihenfolge. In der Praxis werden aber auch Systeme bestehend aus nur zwei Trocknerklassen betrieben, z. B. IR- mit Zylindertrocknung oder Luft- mit Zylindertrocknung. Pilotmaschinen haben dagegen keine Trocknungszyylinder und bestehen aus IR- und Lufttrocknern.

Das Design des Trocknungssegments einer Streichmaschine spiegelt die drei Phasen der Trocknung von gestrichenem Papier wieder [Wal93]: In der ersten Phase erfolgt die Aufwärmung der Bahn nach dem Austritt aus dem Coater. Nachfolgend erfährt die Bahn eine schnelle Trocknung bei noch feuchter gestrichener Oberfläche. Die dritte und letzte Phase zeichnet sich durch die fallende Trocknungsgeschwindigkeit aus.

Daher ergibt sich typischerweise die folgende Reihenfolge an Trocknungsphasen [Wal93]:

1. IR-Trockner werden oft für eine schnelle Aufwärmung der Bahn verwendet. Da sie über eine hohe Energiedichte verfügen, können sie die Bahn innerhalb kürzester Zeit auf "Betriebstemperatur" bringen.
2. Die zweite Stufe der Trocknung wird durch Lufttrockner getragen, die hohe Trocknungsraten bei berührungsfreier Arbeitsweise ermöglichen.
3. Nachdem der Strich im Maschinensegment mit Lufttrocknern immobilisiert wurde, kann die Papierbahn auf die Trockenzylinder geleitet werden. Die Trockenzylinder haben neben ihrer schonenden Trocknungsweise den Vorteil einer stabilen Bahnführung.

2.3.2 IR-Trockner

Die klassische Aufgabe eines IR-Moduls ist das schnelle Vorwärmen der gestrichenen Papierbahn unmittelbar nach dem Coater. Dies ist notwendig, um die Geschwindigkeit der Entwässerung (Penetration) des Striches ins Rohpapier zu erhöhen. Dadurch wird die Bahn schneller berührfähig und kann durch Leitwalzen gelenkt werden, ohne festzukleben.

Die Vorteile von IR-Trocknern sind eine kompakte Bauweise und schnelle Steuerbarkeit. Da die einzelnen Module ihre Leistung örtlich konzentriert ausstrahlen, können sie zum Profilieren der Feuchtigkeit in Querrichtung der Bahn eingesetzt werden. IR-Trockner mit kurzer Reaktionszeit machen sich weiterhin als zusätzliche Energiequelle beim Hochfahren der Streichmaschine nütz-

lich. Sie ersetzen in der Anfangsphase teilweise die Energiezufuhr von trägeren Lufttrocknern.

Der große Nachteil der IR-Trocknung sind die vergleichsweise hohen Betriebskosten, insbesondere bei elektrisch beheizten Modulen.

Während der IR-Trocknung erfolgt die Wärmeabgabe durch thermische Strahlung. Zu diesem Zweck werden Strahlungskörper (Emitter) elektrisch oder durch Verbrennung von Erdgas auf Arbeitstemperatur gebracht, bei der sie die erwünschte Leistung ausstrahlen können. Die Wärmeleistung hängt hauptsächlich von der Emissivität und der Temperatur des Emitters ab. Die von der Bahn aufgenommene IR-Leistung hängt weiterhin von den Eigenschaften des gestrichenen Papiers ab. Je dicker und je feuchter die Bahn, desto empfänglicher ist sie für IR-Strahlung. Die Strahlung im Wellenlängenbereich 2-6 μm wird fast vollständig absorbiert, da sich die Haupt-Absorptionsbanden von Wasser und Fasern in diesem Bereich befinden. Die kürzerwellige Strahlung (0.8-2 μm) wird eher durchgelassen, gestreut oder reflektiert [HeP00]. Die Absorption im kurzwelligen Bereich kann jedoch durch Reflektoren oder Face-To-Face-Anordnung von Strahlern erhöht werden.

Das Herzstück von elektrischen IR-Strahlern ist der mit einem Glühfaden bestückte Emitter. Die emittierten Wellenlängen befinden sich, je nach der Temperatur (max. 2260 °C) des Glühfadens, hauptsächlich im Bereich 0.8-2 μm [Oja93, PeS98, PeS98a, Pet99 und Bed98]. Hinter der Lampe befindet sich ein Reflektor, der die Strahlung in Richtung Papier lenkt. Zwischen Lampe und Papier befindet sich in der Regel eine Schutzplatte aus Quarzglas, um den Emitter vor Verschmutzung zu schützen, da verschmutzte Komponenten verstärkt absorbieren und so die Verluste erhöhen [Oja93].

Die Leistungsdichte eines elektrischen IR-Trockners liegt im Bereich von 250-300 kW/m². Durch den Einbau von Reflektoren oder durch

Face-To-Face-Anordnung lässt sie sich auf etwa 350-400 kW/m² erhöhen. Davon werden aber lediglich 25-40 % beim Durchlaufen der IR-Strecke vom gestrichenen Papier aufgenommen [PeS00].

Bei gasbeheizten IR-Trocknern wird die Arbeitstemperatur des aus poröser Keramik, Keramikfasern oder Metallfasern bestehenden Emitters (800-1100 °C) durch Verbrennung von Erdgas aufrechterhalten. Zwischen 28 und 55 % der Verbrennungsenergie werden hierdurch in Strahlung umgewandelt. Die ausgestrahlte IR-Leistung befindet sich bei ca. 100 bis 220 kW/m². Bedingt durch die Arbeitstemperatur erhält man hier mit Wellenlängen von 1.5-2 µm eine etwas langwelligere Strahlung als bei elektrischem IR. Mehr zu den Charakteristika von gasbeheizten IR-Strahlern findet man in der einschlägigen Literatur [Oja93, SLA95, SLA96, LAS96, Bed98 und MGV98].

Für die Entfernung von Wasserdampf und heißen Abgasen aus dem Modul wird Spülluft verwendet. So haben die im IR-Modul die Papierbahn umgebenden Gase eine Temperatur von 150-300 °C.

2.3.3 Heißlufttrockner

Es gibt zwei Hauptarten von Lufttrocknern: Schwebetrockner mit Luftdüsen an beiden Papierseiten und einseitige Lufttrockner. In der Trocknung von gestrichenem Papier werden hauptsächlich Schwebetrockner verwendet, da sie einen stabilen und ruhigen Bahnlauf ermöglichen. Einseitige Trockner werden eingesetzt, wenn man bevorzugt eine Papierseite trocknen will, wie dies z. B. beim gestrichenen Karton der Fall ist.

Die Steuerung der Betriebsweise von Lufttrocknern erfolgt durch die Parameter Temperatur und Geschwindigkeit der Trocknungsluft. Die Trocknungsluft wird meistens durch Erdgasbrenner erhitzt und erreicht Temperaturen von bis zu 350 °C oder sogar noch höher. Die Strömungsgeschwindigkeiten am Austritt der Düsen beträgt etwa 40 bis 60 m/s, durch Erhöhung der Gebläseleistung auch mehr [HeP00]. Typische Trocknungsraten von Heißlufttrocknern liegen bei 20-80 kg H₂O/(m²h).

2.3.4 Zylindertrockner

Die Zylindertrocknung kann erst nach der Immobilisierung des Striches eingesetzt werden. Daher kommt sie erst in der abschließenden Phase der Trocknung vor. Die Zylinder werden in der Regel durch Dampf beheizt und erreichen Oberflächentemperaturen von 80-110 °C. Manchmal werden zum Schluss einige wassergekühlte Zylinder zur Reduktion der Bahntemperatur vor dem nächsten Coater verwendet, z. B. in der Herstellung von Karton.

Bei der Trocknung von gestrichenem Papier ist die Bahn beim Eintritt in die Zylinderpartie schon weitgehend trocken und lässt sich nur schwer weiter austrocknen. So erreicht man Trocknungsraten von nur 3-6 kg H₂O/(m²h), je nach Bahnfeuchte. Die Bespannung der Zylinder hat einen ebenso hohen Einfluss auf die Intensität der Trocknung. Führt man eine Papierbahn mit niedrigem Flächengewicht über die Zylinderpartie ohne Filzbespannung, so reicht der relativ niedrige Bahnzug für einen guten Papier-Zylinder-Kontakt nicht aus. Der vom Papier mitgerissene Luftfilm befindet sich zwischen den beiden Flächen und kann eventuell dort bestehen bleiben. Der Luftfilm wirkt isolierend und erlaubt nur eine niedrige Wärmeübertragung. Dies gilt insbesondere bei höheren Geschwin-

digkeiten, da sie die Entstehung des Luftfilms begünstigen. In solchen Fällen ist die zusätzliche Anpressung der Bahn auf die Trockenzyylinder für einen sinnvollen Betrieb unerlässlich. Bei höhergewichtigen Papiersorten kann man auch ohne Bespannung einen guten Wärmeübergang erzielen: Sie erlauben einen höheren Bahnzug und laufen meistens bei niedriger Bahngeschwindigkeit.

3 Berechnungsmodell

Die Entwicklung eines Modellsystems für die Trocknung gestrichener Papiere dient zur praxisnahen Simulation von realen Streichmaschinen. Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab mehrere Arbeiten, die sich mit der Trocknung von gestrichenen Papieren beschäftigten [FOL91, Hei92, BeB96, BeB96a, BeB97, RaK95, PDS95, NoS90 und NoS99]. All diese Arbeiten wurden in Hinsicht auf eine gute Anwendbarkeit für die Simulation der Trocknung bewertet. Dabei soll das Modellsystem:

- Bzgl. der Prozeßphysik möglichst vollständig sein,
- Möglichst präzise Vorhersagen bezüglich Bahntemperatur und -feuchte liefern können,
- Auf einer makroskopischen Betrachtungsweise des Materials basieren,
- Strich und Rohpapier voneinander getrennt modellieren,
- Anfangs- und Randbedingungen für eine ausreichende Beschreibung der Trocknung in einer Streichmaschine beinhalten und
- Durch Vergleiche mit Messungen an Pilot- oder Produktionsanlagen eine ausreichende Verifikation erfahren haben.

Das einzige konsistente Modell, das alle oben genannten Kriterien erfüllt, ist in der Arbeit von Heikkilä [Hei92] zu finden. So wurde dieses System als Grundlage für die Entwicklung eines eigenen Modells genommen. Übermäßige Vereinfachungen aus Heikkilä [Hei92] wurden durch Modelle angemessener Tiefe ersetzt. Der benötigte messtechnische Hintergrund wurde auf den heutigen Stand der Technik gebracht und weiterentwickelt.

Das eigene Modellsystem wurde mit dem Ziel entwickelt, mittlere Temperatur und Feuchte einer einfach gestrichenen Papierbahn an

jeder Stelle entlang der Streichmaschine berechnen zu können. Bevor an dieser Stelle auf das physikalisch begründete Berechnungsmodell eingegangen werden kann, muss der qualitative Verlauf der vorhandenen Transportvorgänge vorgestellt werden. Die Prozesse werden in der gleichen Reihenfolge geschildert, wie sie das einfach gestrichene Papier erfährt, wenn es die Maschine durchläuft.

Im Coater beginnt der eigentliche Prozess der Streichveredelung – dort wird die Streichfarbe auf das Rohpapier aufgetragen. Zugleich beginnt das kapillarporöse Rohpapier, Flüssigkeit (Serum) aus der Streichfarbe zu entziehen (Penetration). Druckimpulse, z. B. im Nip einer Filmpresse, verursachen zusätzliche Penetration. Durch das Eindringen von Wasser in den strichseitigen Grenzbereich des sehr trockenen Rohpapiers wird Sorptionsenthalpie freigesetzt. Bei einer typischen Menge an penetrierter Flüssigkeit von 0.3 g/m^2 beträgt der sorptive Wärmeeintrag etwa 150 J/m^2 (siehe Abschnitt 3.5). Ein Rohpapier mit 50 g/m^2 und einem Strichauftrag von 12 g/m^2 erwärmt sich dadurch um etwas mehr als $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Die mittlere Temperatur am Austritt des Coaters ergibt sich aus der oben genannten hygroskopischen Erwärmung und der Mischung der mitgeführten Wärmeinhalte der Stoffströme Papier und Strich.

Zwischen dem Coater und dem ersten intensiven Trockner (z. B. IR) befindet sich ein freier Zug. Die Papierbahn ist hier von stillstehender Raumluft umgeben und legt vorwiegend stückweise gerade Strecken zwischen Umlenkwalzen oder Airturns zurück. Die Bahn erfährt durch ihre Laufgeschwindigkeit konvektive Wärmeübertragung. Der Transport der Feuchtigkeit vollzieht sich durch Penetration aus dem noch sehr feuchtem Strich und durch einsetzende Verdunstung, deren Intensität von der Bahntemperatur abhängt. Wasser ist die einzige Komponente des gestrichenen Papiers, dessen Bewegung für die hier dargestellte Modellierung der Trocknung von Bedeutung ist. Die in der gestrichenen Bahn enthaltene Luft hat wegen ihrer geringen Wärmekapazität einen vernachlässigbaren

Einfluss auf die Enthalpiebilanz. Andererseits wird der Einfluss der Luft auf den Transport der Feuchtigkeit durch die Modelle der Verdunstung mit erfasst (siehe Abschnitte 3.3.4 bis 3.3.6). Daher wird der Transport der Feuchtigkeit im Folgenden vereinfacht Stofftransport genannt.

Die IR-Trocknung zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte aus, die zur starken Aufwärmung der Bahn führt. Außer der Strahlung hat hier die konvektive Wärmeübertragung einen nennenswerten Anteil, da das Papier von der heißen Spülluft der IR-Haube umgeben ist. Die erhöhte Bahntemperatur beschleunigt die Penetration und verkürzt dadurch die Strecke bis zur Immobilisierung des Striches. Die Verdunstung wird gegenüber der zuvor erwähnten freien Strecke ebenso verstärkt. Eine Aufheizung der Bahn auf über 100 °C kann sogar zu extrem hohen Trocknungsraten in der Größenordnung 150-200 kg H₂O/(m²h) führen.

Heißluftbetriebene Konvektionstrockner erzeugen in ihrem Inneren durch besonderes Düsendesign stark turbulente Strömungen. Dies begünstigt hohe Wärme- und Stoffübertragungsraten zwischen Papier und Gasstrom. Eine zusätzliche Wärmequelle ist die Infrarotstrahlung, die von den heißen Wänden des Moduls ausgeht. Die Strahlung trägt hier mit maximal 10 % der Wärmeleistung zur Trocknung bei. Lufttrockner zeichnen sich durch hohe Verdunstungsraten aus, so dass hier in der Regel der Strich immobilisiert.

Der Immobilisierungspunkt der Streichfarbe ist ein Umschlagpunkt sowohl für die Penetration, als auch für die Verdunstung aus dem Strich. Wird dieser kritische Wert des Feststoffgehalts überschritten, so zieht sich die Trocknungsfront von der Oberfläche in das Strichinnere zurück. Das Wasser verdunstet also durch das poröse Medium, wodurch der Stofftransport erschwert wird. Die Penetration setzt an diesem Punkt vollständig aus.

Als letztes wird die Papierbahn durch die Zylinderpartie gefahren. Befindet sich die Bahn auf einem Zylinder, so ist sie einseitig von Raumluft umgeben. Die andere Papierseite ist von der Zylinderoberfläche verdeckt. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Kontakt zwischen Walze und Papier und luftseitige Konvektion. Die Verdunstung ist daher nur luftseitig möglich. Für die Verbesserung der Wärmeübertragung wird die Bahn mittels einer Filzbespannung gegen die Walzenoberflächen gepresst. Diese außen liegende Filzschicht erschwert jedoch den Stofftransport.

Der Stofftransport vollzieht sich durch zwei grundsätzliche Mechanismen: Umverteilung der Feuchte durch Penetration der flüssigen Phase und Verdunstung. Die Penetration transportiert Flüssigkeit aus dem Strich in das Rohpapier. Dort konzentriert sich der penetrierte Serum in einer dünnen Schicht des Papiers unmittelbar unter dem Strich. Da der Rest des Rohpapiers keine Flüssigkeitszufuhr erfährt, entspringt die Verdunstung im Wesentlichen dieser Papierschicht.

Um die Trocknung eines einfach gestrichenen Papiers unter den oben beschriebenen Bedingungen abzubilden, benötigt man ein eindimensionales Zonenmodell, das den Papierquerschnitt in Dickenrichtung darstellt. Ein eindimensionales Modell reicht aus, da die mittlere Temperatur und Feuchte der Papierbahn berechnet werden sollen. Aus diesem Grund kann die gestrichene Papierbahn als ein in der Papierebene homogenes Material angenommen werden. So können wegen der Symmetriebedingungen alle Transportvorgänge in der Papierebene vernachlässigt werden. Die Notwendigkeit für die Einführung der Zonen ergibt sich aus der Struktur des gestrichenen Papiers. Sie besteht aus Schichten, die unterschiedliche Porenstrukturen und Feuchtigkeitsniveaus aufweisen. Die Differenzen in der Beschaffenheit der einzelnen Bereiche verursachen Unterschiede in ihrem Verhalten gegenüber dem Stofftransport. So werden die in sich homogenen Zonen Strich, befeuchtetes Papier und trockenes

Papier voneinander unabhängig modelliert (Abbildung 3.1). Dabei wird die Annahme getroffen, dass alle Zonen die gleiche Temperatur aufweisen. Dies gilt für verhältnismäßig dünne Papiere, wo über dem Querschnitt bzw. zwischen den beiden Papierseiten keine wesentlichen Temperaturdifferenzen gemessen werden können. Die Temperatur der beiden Oberflächen konnte dabei nur in den freien Zügen gemessen werden. Messungen unmittelbar nach den Trocknermodulen zeigen aber auch keine wesentlichen Temperaturunterschiede auf. So wurde angenommen, dass das Gleiche für das Innere der Trockner gilt.

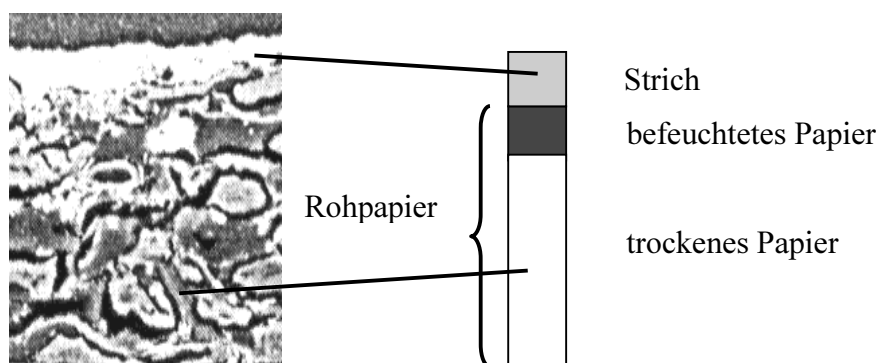


Abbildung 3.1: Darstellung des Zonenmodells für gestrichenes Papier bestehend aus den Bereichen Strich, befeuchtetes Rohpapier und trockenes Rohpapier (links: REM-Aufnahme des Papierquerschnitts)

Der Kern des im Folgenden vorgestellten Berechnungsmodells besteht aus Stoffbilanzen für jede materielle Zone und einer gemeinsamen Enthalpiebilanz über alle Zonen. Die Auswertung der Bilanzen wird entlang der Maschine instationär durchgeführt, in materieller Betrachtungsweise. Das materielle Zonenmodell (Abbildung 3.1) durchfährt die Maschine in Laufrichtung. Die Berechnung startet zum Zeitpunkt des Austritts aus dem Coater mit zwei Anfangsbedingungen. Die erste Bedingung bezieht sich auf die Verteilung der Feuchtigkeit auf die drei Zonen, die zweite auf die Bahntemperatur zum zeitlichen Nullpunkt. Beide können durch direkte Messung bestimmt werden.

3.1 Allgemeine Bilanzgleichungen

In diesem Abschnitt werden die allgemeinen Bilanzgleichungen mit fundamentaler Bedeutung für die Beschreibung der Thermodynamik der Trocknung dargestellt. Zu diesem Zweck wird hier die verallgemeinerte Variable A eingeführt, mit a als spezifischem Wert, der auf eine Masseneinheit bezogen ist [Gya70]. Die physikalische Eigenschaft, die durch die Variable A repräsentiert wird, ist über ein Körper mit der Dichte ρ und dem Volumen V (siehe Abbildung 3.2) verteilt.

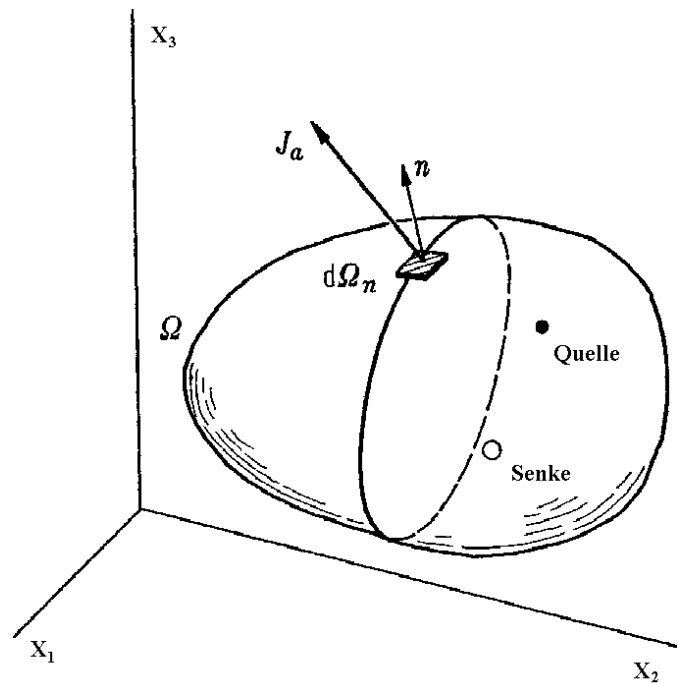


Abbildung 3.2: Bilanzraum für die Aufstellung allgemeiner Bilanzen [Gya70]

So lautet die Beziehung zwischen A und α :

$$A = \int_V \rho a dV \quad (1)$$

Eine zeitliche Veränderung der Größe A kann aus zwei Gründen eintreten: Durch den Transport (Flux J_a) der Eigenschaft A durch die Grenzfläche Ω des Volumens V oder durch eine Produktion σ_a innerhalb des Volumens durch Vorhandensein von Quellen/Senken.

Wie in Abschnitt 3 schon erwähnt, wird der Trocknungsprozess aufgrund eines eindimensionalen materiellen Elements berechnet, das sich mit der Papierbahn bewegt. Für die Aufstellung einer entsprechenden Bilanzgleichung eignet sich also die materielle Schreibweise. Die Gleichung für die Änderung der allgemeinen Variable A , d. h. die allgemeine materielle Bilanzgleichung, lautet in ihrer integraler Form

$$\int_V \rho \dot{a} dV = - \int_{\Omega} \vec{J}_a \cdot d\vec{\Omega} + \int_V \sigma_a dV \quad (2).$$

Mit der Anwendung des Gauss'schen Integralsatzes erhält man die differentiale Form

$$\rho \dot{a} + \text{div} \vec{J}_a = \sigma_a \quad (3)$$

der allgemeinen Bilanzgleichung. Diese Gleichung soll nun in eine Form überführt werden, die für die Modellierung der Trocknung verwendet werden kann. Dazu muss die allgemeine Variable A durch Größen ersetzt wird, die den Trocknungsprozess thermodynamisch beschreiben. Diese Größen sind die Feuchte X , die Energie E und die Entropie S . Für die Bilanz der Feuchte (Massenbilanz) erhält man

$$\rho \dot{X} + \text{div} \vec{J}_X = \sigma_X \quad (4).$$

Analog gilt für die Energie und die Entropie

$$\rho \dot{e} + \text{div} \vec{J}_e = \sigma_e \quad (5),$$

$$\rho \dot{s} + \text{div} \vec{J}_s = \sigma_s \quad (6).$$

Da allerdings der Einfluss der mechanischen Kräfte auf die Trocknung von gestrichenem Papier vernachlässigt werden kann, wird in der Gleichung 5 statt der Energie die Enthalpie h verwendet:

$$\rho \dot{h} + \operatorname{div} \vec{J}_h = \sigma_h \quad (7)$$

Aus dieser Gleichung kann eine Entropiebilanz hergeleitet werden, die mehr Detail aufweist als Gleichung 6. Dazu setzt man in Gleichung 7 den Zusammenhang zwischen der Enthalpie h und der inneren Energie u

$$h = u + pv \quad (8)$$

ein. Dabei steht p für den absoluten Druck und v für das spezifische Volumen. Mit Hilfe der Gibbs'schen Gleichung für die Entropie eines Systems mit K Komponenten

$$\dot{s} = \frac{1}{T} \dot{u} + \frac{p}{T} \dot{v} - \sum_{k=1}^K \frac{\mu_k}{T} \dot{c}_k \quad (9)$$

erhält man folgende Bilanz [Gya70]:

$$\rho \dot{s} + \frac{1}{T} \operatorname{div} \vec{J}_q - \sum_{k=1}^K \frac{\mu_k}{T} \operatorname{div} \vec{J}_k = \sigma_s \quad (10)$$

In Gleichungen 9 und 10 bezeichnen T die Systemtemperatur, μ_k und c_k das chemische Potential bzw. die Konzentration der Komponente k . Die Flux-Größen stehen für den Transport von Wärme (J_q) und der Komponente k (J_k). Bei der Trocknung von gestrichenem Papier spielen sich im Wesentlichen keine chemischen Reaktionen ab. Außerdem verursachen die äußeren Kräfte keine direkte Veränderung der Entropie der Komponenten von gestrichenem Papier.

Daher besteht σ_s [Gya70] aus Produktionstermen bedingt durch Wärmeleitung σ_{cond}

$$\sigma_{cond} = \vec{J}_q \cdot grad\left(\frac{1}{T}\right),$$

diffusive Stoffübertragung σ_{diff}

$$\sigma_{diff} = - \sum_{k=1}^K \vec{J}_k \cdot grad\left(\frac{\mu_k}{T}\right) \text{ und}$$

reibungsbehafteten, konvektiven Stofftransport σ_{conv}

$$\sigma_{conv} = -\frac{1}{T} \bar{\bar{P}}^S : (\nabla \vec{v})^S.$$

Die Entropieproduktion beim konvektiven Stofftransport beinhaltet Verluste, die durch die innere Reibung des Fluids (Scherviskosität) entstehen. Man kann dies aus dem Skalarprodukt des symmetrischen Teils $\bar{\bar{P}}^S$ des Drucktensors $\bar{\bar{P}}$ und des symmetrischen Teils $(\nabla \vec{v})^S$ des Gradienten der Fluidgeschwindigkeit $\nabla \vec{v}$ errechnen. Beide genannte Tensoren sind zweiter Ordnung und haben für inkompressible Fluide als Spur den Wert 0. Die Entropiebilanz lautet dann

$$\rho \dot{s} + div \frac{\vec{J}_q - \sum_{k=1}^K \mu_k \vec{J}_k}{T} = \sigma_{cond} + \sigma_{conv} + \sigma_{diff} \quad (11).$$

Für die Auswertung der Gleichung 11, insbesondere bezogen auf den Stofftransport, fehlen zur Zeit die in der Trocknungstechnik praktisch anwendbaren Modelle (siehe [Lam79]). Deshalb beschränkt sich diese Arbeit auf die Simulation der Trocknung an-

hand der Feuchte- und Enthalpiebilanz (Gleichungen 4 und 7). Dementsprechend findet man im Folgenden die Beschreibung der Wärmeübertragung (Abschnitt 3.2) und des Stofftransports (Abschnitt 3.3) für die praktische Umsetzung der Bilanzen.

3.2 Wärmeübertragung

In diesem Abschnitt werden Transport und Bilanzierung der Energie bei der Trocknung von einfach gestrichenem Papier beschrieben. Das Bilanzieren der Energie wird in Abschnitt 3.2.1 dargestellt. Bei der Trocknung der Bahn kommt es zur Phasenumwandlung von Wasser und dadurch zur Umsetzung von Verdampfungs- und Sorptionsenthalpie (Abschnitt 3.2.1). Im Abschnitt 3.2.2 wird der thermische Einfluss des Strichauftrags berücksichtigt und die Bahntemperatur unmittelbar nach dem Coater berechnet. Über die Bilanzgrenze wird Wärme mit der Umgebung durch Konvektion (Abschnitt 3.2.3), Strahlung (Abschnitt 3.2.4) und Kontakt (Abschnitt 3.2.5) ausgetauscht.

3.2.1 Enthalpiebilanz

Das gestrichene Papier bestehend aus verschiedenen Feststoffen, Luft und Wasser wird unter annähernd konstantem Druck getrocknet. Da unter diesen Bedingungen die gesamte zugeführte Wärme in die Erhöhung der Enthalpie des Materials geht, können wir bei der Bilanzierung der Energie die Enthalpie für Systembeschreibung verwenden. Die Enthalpiebilanz wird vorerst für jede Zone des gestrichenen Papiers einzeln durchgeführt (vgl. Abbildungen 3.1 und 3.3).

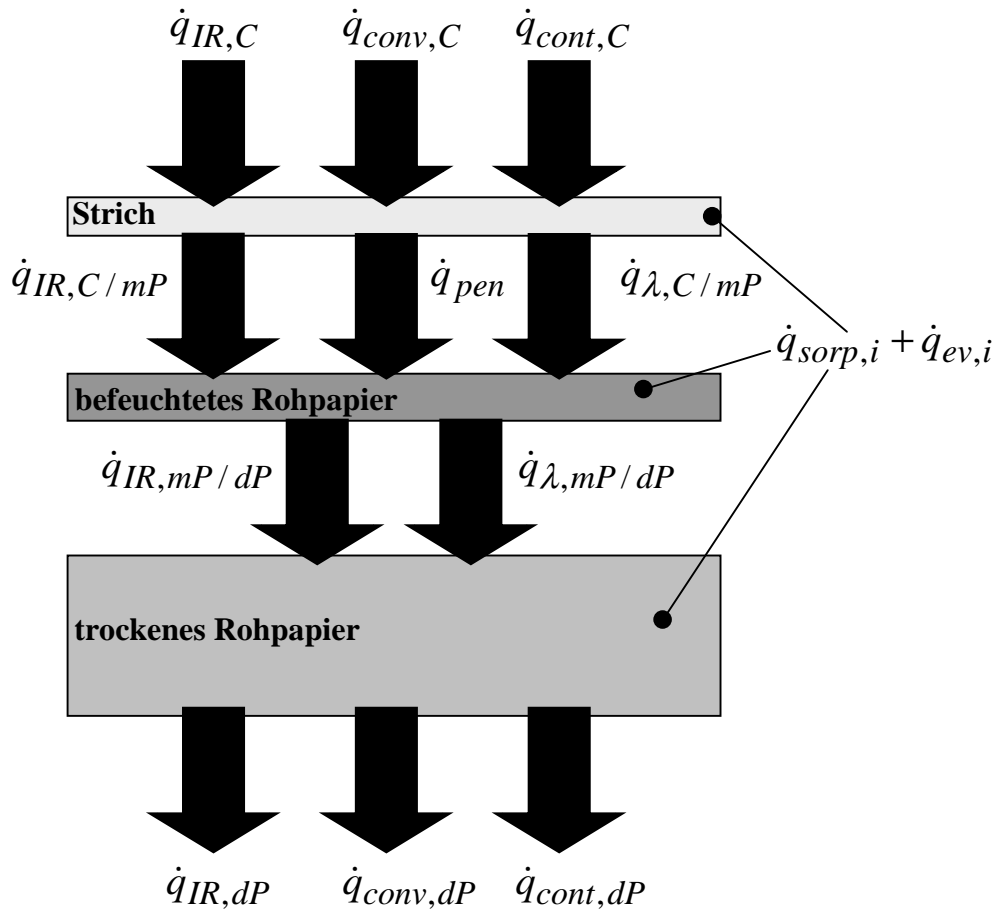


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung von Wärmetransport im einfach gestrichenen Papier unter Einbeziehung aller Transportmechanismen

Die oberste Schicht (Strich, Abbildung 3.3) gekennzeichnet durch den Index C erfährt drei externe Wärmeströme über Infrarotstrahlung ($\dot{q}_{IR,C}$), Konvektion ($\dot{q}_{conv,C}$) und Kontaktwärmeübertragung ($\dot{q}_{cont,C}$). Die IR-Strahlung stammt von heißen Oberflächen in der Umgebung der Papierbahn und liefert einen positiven Energieeintrag. Durch Konvektion kann man dem System sowohl Wärme hinzufügen, als auch entnehmen, je nach der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungsluft und der Papierbahn. In der Kontakt-Wärmeübertragung liegt die Bahn auf der warmen Oberfläche von Trockenzylindern auf und wird hierdurch aufgewärmt.

Zwischen den beiden Zonen Strich und befeuchtetem Rohpapier (Index mP) bestehen Wärmeströme infolge Strahlung ($\dot{q}_{IR,C/mP}$), Wärmeleitung ($\dot{q}_{\lambda,C/mP}$) und Penetration (\dot{q}_{pen}). Die Wärmeleitung und ein Teil der Wärmeübertragung durch Strahlung erfolgen wegen der Temperaturunterschiede zwischen den beiden Schichten. Ein anderer Anteil der übertragenen Strahlungsenergie ist dadurch vorhanden, dass sich die Schichten von der externen Strahlung gegenseitig nicht vollkommen abschirmen können. Der Wärmetransport durch Penetration kommt dadurch zustande, dass Flüssigkeit aus dem Strich ins Rohpapier sickert und dabei ihr Temperaturniveau ändert.

Der Energieaustausch zwischen den Zonen befeuchtetes und trockenes Rohpapier (Index dP) erfolgt analog, wie zwischen Strich und befeuchtetem Papier. Auch hier sind die beiden Mechanismen infolge IR-Strahlung ($\dot{q}_{IR,mP/dP}$) und Wärmeleitung ($\dot{q}_{\lambda,mP/dP}$) vorhanden.

Die trockene Papierschicht verhält sich als äußere Schicht dem Strich ähnlich: Die papierseitige externe Wärmeübertragung vollzieht sich durch IR-Strahlung ($\dot{q}_{IR,dP}$), Konvektion ($\dot{q}_{conv,dP}$) und Kontaktwärmeübertragung ($\dot{q}_{cont,dP}$). Zusätzlich wird in jeder der drei Zonen (Index i) durch die Verdunstung von freiem und hygroskopisch gebundenem Wasser Sorptions- und Verdampfungsenthalpie ($\dot{q}_{sorp,i} + \dot{q}_{ev,i}$) frei bzw. gebunden. Die Enthalpie der Phasenumwandlung ist die Summe aus der Verdampfungs- und der Sorptionsenthalpie. Dadurch wird das System abgekühlt, sobald Wasser aus flüssigem oder absorbiertem Zustand in die Dampfphase übertritt. Eine Aufwärmung erfährt das gestrichene Papier bei der Sorption von Wasser im Rohpapier. Diese zusätzliche Feuchte kann

durch Penetration oder aus der Umgebungsluft in das Papier gelangen.

Aufgrund der in Abbildung 3.3 skizzierten Sachverhalte und der allgemeinen materiellen Enthalpiegleichung (Gleichung 7) können nun Bilanzgleichungen für Enthalpie aufgestellt werden. Diese gelten für die einzelnen Zonen des gestrichenen Papiers:

$$\rho_C \dot{h}_C + \left(-\dot{q}_{IR,C} - \dot{q}_{conv,C} - \dot{q}_{cont,C} + \dot{q}_{pen} + \dot{q}_{IR,C/mP} + \dot{q}_{\lambda,C/mP} \right) = \dot{q}_{sorp,C} + \dot{q}_{ev,C} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \rho_{mP} \dot{h}_{mP} + \left(-\dot{q}_{pen} - \dot{q}_{IR,C/mP} - \dot{q}_{\lambda,C/mP} + \dot{q}_{IR,mP/dP} + \dot{q}_{\lambda,mP/dP} \right) = \\ = \dot{q}_{sorp,mP} + \dot{q}_{ev,mP} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho_{dP} \dot{h}_{dP} + \left(\dot{q}_{IR,mP/dP} + \dot{q}_{\lambda,mP/dP} + \dot{q}_{IR,dP} + \dot{q}_{conv,dP} + \dot{q}_{cont,dP} \right) = \\ = \dot{q}_{sorp,dP} + \dot{q}_{ev,dP} \end{aligned} \quad (14)$$

Im Abschnitt 3 wurde die Annahme getroffen, dass über die gesamte Dicke des gestrichenen Papiers die gleiche Temperatur herrscht ($T_C = T_{mP} = T_{dP}$). Dies wird neben messtechnischer Indizien (siehe Abschnitt 3) dadurch begründet, dass in dieser Arbeit nur dünne Papiere berücksichtigt werden. Sind also Temperaturunterschiede über die Dickenrichtung des gestrichenen Papiers vorhanden, so gleichen sich diese durch Wärmeleitung schnell aus. Als Indikator für diesen Vorgang kann man die Fourier-Zahl

$$Fo = \frac{at}{L_{CP}^2}$$

verwenden. Dabei sind a und L_{CP} die Temperaturleitfähigkeit und die Dicke von gestrichenem Papier. Ist die Fourier-Zahl für eine charakteristische Zeit t mit $Fo \gg 1$ sehr groß, so handelt es sich hierbei um einen stationären Wärmeleitvorgang. Dünne gestrichene Papiere haben eine Dicke von bis zu 100 μm und eine Temperaturleitfähigkeit von der Größenordnung $10^{-7} m^2/s$. Sie erreichen nach diesem Kriterium einen annähernden Temperatúrausgleich schon nach einer kurzen Zeit von höchstens 100 ms.

Die messtechnisch festgestellten Unterschiede in der Temperatur der beiden Papieroberflächen betrug höchstens $\Delta T = 2-3$ °C. Diese Annahme hat zur Folge, dass der Wärmetransport durch Leitung ($\dot{q}_{\lambda,i}$) und Penetration (\dot{q}_{pen}) in den Bilanzgleichungen 12-14 entfällt. Außerdem werden die unterschiedlichen Wärmeeinträge, die durch IR-Absorption in den modellierten Zonen entstehen, durch Wärmeleitung ausgeglichen. Berücksichtigt man noch, dass der Strich im Unterschied zum Rohpapier kein hygroskopisches Medium ist (siehe Abschnitte 3.5.3 und 3.5.4), so wird der Term $\dot{q}_{sorp,C}$ in Gleichung 12 zu Null gesetzt. Daraus erhält man die neue, vereinfachte Enthalpiebilanz:

$$\rho_C \dot{h}_C + (-\dot{q}_{IR,C} - \dot{q}_{conv,C} - \dot{q}_{cont,C}) = \dot{q}_{ev,C} \quad (15)$$

$$\rho_{mP} \dot{h}_{mP} = \dot{q}_{sorp,mP} + \dot{q}_{ev,mP} \quad (16)$$

$$\rho_{dP} \dot{h}_{dP} + (\dot{q}_{IR,dP} + \dot{q}_{conv,dP} + \dot{q}_{cont,dP}) = \dot{q}_{sorp,dP} + \dot{q}_{ev,dP} \quad (17)$$

Die Berechnungsvorschrift der Enthalpie für Festkörper und Flüssigkeiten mit der Wärmekapazität C_P ohne Berücksichtigung von Phasenwechsel lautet

$$h = c_P(T)T \quad (18).$$

Verwendet man nun statt der Dichte ρ das in der Papierbranche übliche Flächengewicht m und addiert man die Gleichungen 15 bis 17, so ergibt sich eine Enthalpiebilanz

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} (m_C c_{P,C} + m_{mP} c_{P,mP} + m_{dP} c_{P,dP}) T + \\ & + (m_C c_{P,C} + m_{mP} c_{P,mP} + m_{dP} c_{P,dP}) \frac{dT}{dt} = \\ & = \dot{q}_{IR,C} - \dot{q}_{IR,dP} + \dot{q}_{conv,C} - \dot{q}_{conv,dP} + \dot{q}_{cont,C} - \dot{q}_{cont,dP} + \\ & + \dot{q}_{ev,C} + \dot{q}_{ev,mP} + \dot{q}_{ev,dP} + \dot{q}_{sorp,mP} + \dot{q}_{sorp,dP} \end{aligned} \quad (19).$$

$\frac{d}{dt}$ ist dabei eine Ableitung nach der Zeit t . Da im Vergleich zu den anderen Termen in Gleichung 19 der Beitrag des Ausdrucks $\frac{d}{dt} (m_C c_{P,C} + m_{mP} c_{P,mP} + m_{dP} c_{P,dP}) T$ klein ist, kann dieser vernachlässigt werden. So lautet die Enthalpiebilanz nun

$$\begin{aligned} & (m_C c_{P,C} + m_{mP} c_{P,mP} + m_{dP} c_{P,dP}) \frac{dT}{dt} = \\ & = \dot{q}_{IR,C} - \dot{q}_{IR,dP} + \dot{q}_{conv,C} - \dot{q}_{conv,dP} + \dot{q}_{cont,C} - \dot{q}_{cont,dP} + \\ & + \dot{q}_{ev,C} + \dot{q}_{ev,mP} + \dot{q}_{ev,dP} + \dot{q}_{sorp,mP} + \dot{q}_{sorp,dP} \end{aligned} \quad (20).$$

Die Bilanzgleichung 20 umfasst alle drei Modellzonen aus Abbildung 3.1. Ihre graphische Darstellung erfolgt in der folgenden Abbildung 3.4.

Gleichung 20 kann nun explizit nach der Temperaturänderung dT aufgelöst und explizit berechnet werden, soweit Wärmeströme und Zustand des Trocknungsgutes bekannt sind. Unter dem Zustand der gestrichenen Papierbahn werden hier ihre Temperatur und Feuchte verstanden. Aus diesem Zustand können dann materialbehaftete Größen, wie z.B. c_P , berechnet werden (siehe Abschnitt 3.5).

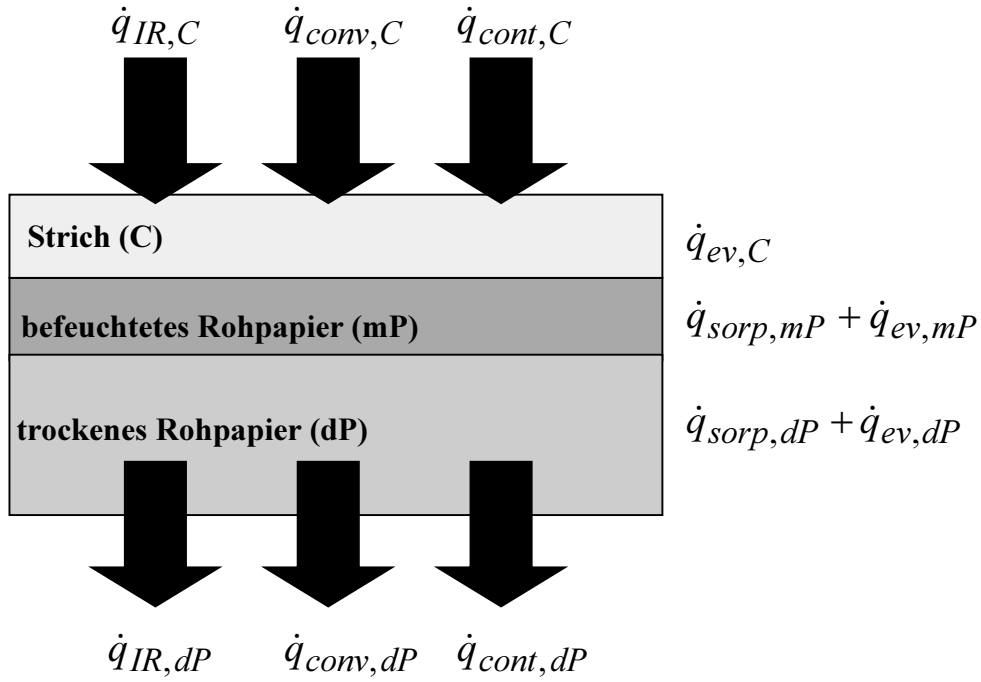


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Transport- und Quellterme der Wärmebilanz (Gleichung 20) für den 3-Zonen-Modell nach Abbildung 3.1

Gleichung 20 zeigt über die Wärmeströme der Phasenumwandlung

$$\dot{q}_{ev,i} = \dot{m}_{ev,i} h_{ev,i} \quad \text{und} \quad (21)$$

$$\dot{q}_{sorp,i} = \dot{m}_{ev,i} h_{sorp,i} \quad (22)$$

eine Verknüpfung zum Stofftransport über den Verdunstungsmassenstrom $\dot{m}_{ev,i}$ aus der i -ten Modellzone. $h_{ev,i}$ und $h_{sorp,i}$ bezeichnen die Enthalpien der Verdunstung und der Sorption für die betreffende i -te Modellzone (Abbildung 3.1).

3.2.1 Thermische Anfangsbedingung

Wie in Abschnitt 3 schon erwähnt, benötigt das Berechnungsmodell die Temperatur der gestrichenen Papierbahn unmittelbar nach dem Coater als Anfangsbedingung. Die Physik der Aufwärmung der Papierbahn läßt sich folgendermaßen beschreiben:

Das trockene Rohpapier betritt das Streichaggregat mit der Temperatur T_{p0} . Auf dieses wird eine Schicht Streichfarbe mit der Temperatur T_{c0} aufgetragen. Die beiden zusammengefügt Schichten verbringen dann eine gewisse Zeit t_0 im Coater. Während dieser penetriert etwas Wasser in die oberste Schicht des Rohpapiers. Die Dicke dieser Schicht beträgt ca. 3-5 μm . Das eingedrungene Wasser wird von den Fasern aufgesaugt, wodurch die Sorptionswärme Q_{sorp} freigesetzt wird. Bilanziert man zudem die mitgeführten Wärmeströme von Papier und Strich, so ergibt sich die Bahntemperatur T_{CP} nach dem Coater. Der Mischungsansatz für die resultierende Temperatur lautet:

$$T_{CP} = \frac{Q_{sorp} + m_P T_{p0} c_P + m_C T_{c0} c_C}{m_P c_P + m_C c_C} \quad (23)$$

Die Sorptionswärme

$$Q_{sorp} = m_{PZ} \int_{X_{PZ0}}^{X_{PZ1}} h_{sorp}(y) dy \quad (24)$$

erhält man durch Integration der spezifischen Sorptionsenthalpie h_{sorp} (siehe Abschnitt 3.4.3) über das Auffeuchten des Rohpapiers durch die penetrierte Serummengende m_{pen} (siehe Abschnitt 3.4.3.4 und 4.2.1). Das Trockengewicht der Penetrationszone im Rohpapier m_{PZ} feuchtet die Penetrationszone des Rohpapiers von der ur-

sprüngen Papierfeuchte X_{PZ0} auf X_{PZ1} auf. Die Feuchte X ist dabei als

$$X = \frac{m_{water}}{m_{dry}} \quad (25)$$

definiert. Die Feuchte der Penetrationszone nach erfolgter Penetration beträgt

$$X_{PZ1} = X_{PZ0} + \frac{m_{pen}}{m_{PZ}} \quad (26).$$

3.2.2 Konvektive Wärmeübertragung

Die konvektive Wärmeübertragung zwischen Papierbahn und Umgebungsluft findet in der gesamten Streichmaschine statt. Die Modellbildung der Wärmeübertragung für die konvektive Randbedingung erfolgt durch empirische Korrelationen in Form von Nusselt-Beziehungen [KrK92]:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (27)$$

Die Nusselt-Zahl Nu wird hier über die Reynolds-Zahl Re

$$Re = \frac{VL}{\nu_{air}} \quad (28)$$

und Prandtl-Zahl Pr

$$Pr = \frac{\eta_{air} c_{p,air}}{\lambda_{air}} \quad (29)$$

berechnet. C ist hier eine Konstante abhängig von der Geometrie der Umgebung und von den Strömungsverhältnissen. In den dimensionslosen Kennzahlen kommen die Geschwindigkeit der Strömung V , die charakteristische Länge L und die temperaturabhängigen Luft-Kennwerte vor: Die kinematische ν_{air} und dynamische Viskosität η_{air} , die Wärmeleitfähigkeit λ_{air} und die spezifische Wärmekapazität $c_{p,air}$. Als charakteristische Länge L wurde in dieser Arbeit die Länge des jeweiligen Moduls gewählt, in Anlehnung an das Modell einer parallel angeströmten Ebene.

Aufgrund der Definition der Nu-Zahl

$$Nu = \frac{L\alpha}{\lambda_{air}} \quad (30),$$

kann aus Gleichung 28 der Wärmeübergangskoeffizienten α berechnet werden. Dieser wird bei der Berechnung der konvektiv übertragenen Wärmestromdichte \dot{q}_{conv}

$$\dot{q}_{conv} = \alpha(T_{air}^{bulk} - T_{CP}) \quad (31)$$

eingesetzt. Der konvektive Wärmestrom wird durch die Differenz zwischen der Bulktemperatur T_{air}^{bulk} der Trocknungsluft und der Bahntemperatur T_{CP} aufrecht erhalten.

Eine konvektive Trocknung findet überall in der Maschine statt: In den freien Zügen, in IR-Trocknern, in Lufttrocknern und auf Trockenzyklindern. Bevor man aber die Besonderheiten unterschiedlicher Modi der Wärmeübertragung im Einzelnen betrachtet, muss man klären, ob die Papierbahn als glatte Fläche angesehen werden kann. Dies ist insbesondere für die verwendeten Modelle der parallel angeströmten Platte (freie Züge, Abschnitt 3.2.3.1) und der Kanalströ-

mung (IR-Trockner, Abschnitt 3.2.3.2) von Bedeutung. Die Korrelationen für diese beiden Fälle wurden aus der Literatur [VDI84] entnommen und gelten für glatte Oberflächen. Daher galt es, einen kritischen Grenzwert der Rauigkeit zu finden, unterhalb dessen die betrachtete Flächen als eben angesehen werden können.

Die Rauigkeit hat erst einen Einfluß auf die Ausbildung der Strömungsgrenzschicht und dadurch auf die Wärmeübertragung, wenn die tatsächliche Rauhtiefe k den zulässigen Wert k_{cr} übersteigt [Sch65].

$$k_{cr} = 100 \frac{v_{air}}{V_{air}^{bulk}} \quad (32)$$

In den betreffenden Teilen einer Streichmaschine kann man mit $v_{air} \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ für die kinematische Viskosität und mit $V_{air}^{bulk} \approx 20 \text{ m/s}$ als Bulkgeschwindigkeit der Luft rechnen. Die charakteristische Rautiefe für gestrichene Papiere ist von der Ordnung $O(k) = 10^{-6}$ bis 10^{-5} m . Aus Gleichung 32 ergibt sich für den zulässigen Grenzwert der Rauigkeit

$$k_{cr} \approx 10^{-4} \text{ m} \quad (33).$$

Der Wert der kritischen Rautiefe k_{cr} liegt um ein bis zwei Größenordnungen über den tatsächlich auftretenden Werten der Rauigkeit k . So kann man im Folgenden mit der gerechtfertigten Vereinfachung arbeiten, dass gestrichenes Papier hydraulisch glatt ist.

3.2.3.1 Freie Züge

Ebene Strecken zwischen zwei Walzen, kalt betriebene Airturns und frei stehende Walzenumschlingungen werden im Berechnungsmodell als freie Züge eingestuft. Sie werden mathematisch als streckenweise parallel angeströmte ebene Platten abgebildet. Die Länge eines Abschnittes wird jeweils als der geometrische Abstand L zweier Leitelemente (z. B. Leitwalzen) der Papierbahn angesetzt, da diese die Strömungsgrenzschicht unterbrechen. Die Plattenströmung wird als turbulent mit laminarer Grenzschicht angenommen. Die mittlere Nusselt-Zahl der Plattenströmung Nu_{plat} beträgt dann [KrK92]

$$Nu_{plat} = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (34),$$

mit der Nu_{lam} -Zahl

$$Nu_{lam} = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

für die laminare Grenzschicht und der Nu_{turb} -Zahl

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (36)$$

bei turbulenter Strömung. Die hier verwendete Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{W_P L}{v_{air}} \quad (37)$$

wird über die Geschwindigkeit der Papierbahn W_P durch die stehende Umgebungsluft definiert.

Gleichung 34 beschreibt den Fall idealer Strömungsbedingungen an einer ebenen Platte. Wegen verwickelter Konstruktion in der Streichmaschine kann für die Berechnung der Wärmeübertragung unter Umständen ein Korrekturfaktor C_{geo}

$$Nu = C_{geo} Nu_{plat} \quad (38)$$

zur Berücksichtigung geometrischer Besonderheiten notwendig werden.

3.2.3.2 Kanalströmung in IR-Modulen

Der Spalt zwischen Papierbahn und IR-Module weist einen kanalähnlichen Aufbau vor.

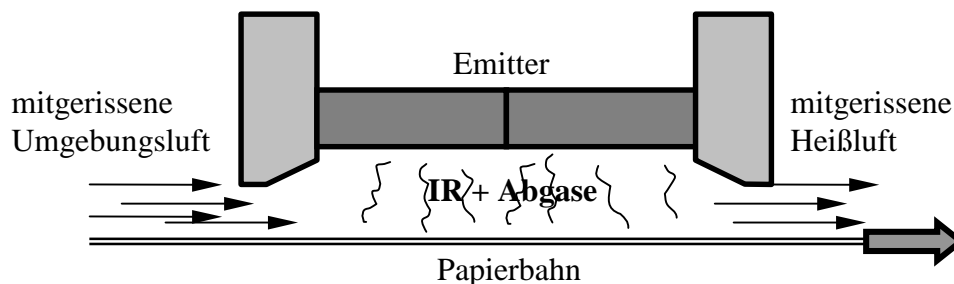


Abbildung 3.5: Kanalähnlicher Strömungsbild in einem gasbeheizten IR-Strahler

Das im IR-Trockner entstehende Strömungsbild kann vereinfacht durch Korrelationen für einen ebenen Kanal abgebildet werden. Die Nu -Beziehung für eine Kanalströmung lautet [VDI84]

$$Nu = 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (39).$$

Die Pr - und die Re -Zahl werden hier nach Gleichungen 29 und 37 berechnet. Zu vermerken ist, daß die Re-Zahl mit dem hydraulischen Durchmesser D_h des Strömungskanals als charakteristische Länge gebildet wird. Den mittleren hydraulischen Durchmesser D_h und die Abschnittslänge L bestimmt man nach Abbildung 3.6 und Gleichung 40.

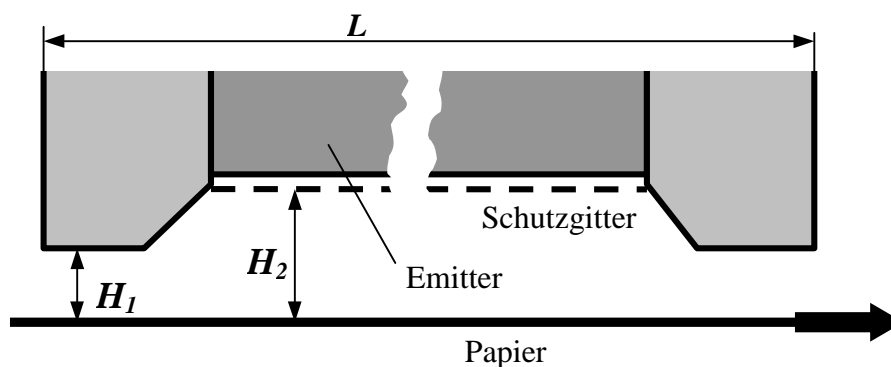


Abbildung 3.6: Skizze der Geometrie einer IR-Haube

Der hydraulischen Durchmesser

$$D_h = 2H_m = 2 \frac{H_1 + H_2}{2} = H_1 + H_2 \quad (40)$$

läßt sich aus der mittleren Kanalhöhe H_m und diese wiederum aus den lokalen Werten H_1 und H_2 berechnen (siehe Abbildung 3.6).

3.2.3.3 Konvektionstrockner

Auf dem Gebiet der Wärmeübertragung in Lufttrocknern sind in der Literatur zahlreiche Arbeiten bekannt [SKH70, RiL73, Lee74, Mar77, Joh78, Lam85, Pol93, Aus96, GaS03]. Es handelt sich dabei um Untersuchungen sowohl an Einzeldüsen, als auch an Düsengrup-

pen mit senkrecht zur Guts Oberfläche auftretendem Luftstrahl. Industrielle Konvektionstrockner haben im Unterschied zu den relativ einfachen untersuchten Modellsystemen eine komplexe Bauart. Die große Anzahl vorhandener Düsenformen und deren Kombinationsmöglichkeiten erschweren eine einheitliche Charakterisierung. Daher ist es nicht möglich, die Wärmeübertragung in solchen Anlagen aufgrund einfacher, theoretisch hergeleiteter Korrelationen zu berechnen. Es besteht allerdings die Möglichkeit, anhand dimensionsanalytischer Überlegungen empirische Korrelationen zur Wärmeübertragung aufzustellen. Üblich ist die Darstellung der Nu -Zahl durch einen Produktansatz der Re - und der Pr -Zahl [VDI83, Hei92, KrK92, GaS03]. In dieser Arbeit wird für die Beschreibung von Konvektionstrocknern die eigens entwickelte Korrelation

$$Nu = C_{geo2} Re_{noz}^m Re_P^n Pr^p \quad (41)$$

verwendet. Die Faktoren C_{geo2} , m , n und p werden an Messergebnisse angepasst, die bei einer möglichst vollständigen Variation der Betriebsparameter im Trockner gewonnen werden (Abschnitt 3.2.3.4). Der Ansatz in Gleichung 41 hat die Besonderheit, dass er zwei Re -Zahlen beinhaltet, da die Strömung im Lufttrockner durch zwei charakteristische Geschwindigkeiten beeinflusst wird. Die Strömungsgeschwindigkeit der Trocknungsluft, wie sie aus den Düsen des Trockners austritt, wird durch Re_{noz} dargestellt [Hil69, Cha74, SMD80]. Die Strömungsgeschwindigkeit der durch die bewegte Papierbahn mitgerissenen Luftschicht wird durch Re_P erfasst [SRS77, Lam85].

Die im Ansatz 41 vorkommenden Re -Zahlen werden folgendermaßen definiert:

$$Re_{noz} = C_{geo3} \frac{D_{noz}}{\nu_{air}} \cdot \sqrt{\frac{P_{noz}}{\rho_{air}}} \quad (42)$$

$$\text{Re}_p = \frac{H}{\nu_{air}} \cdot W_p \quad (43)$$

Die Reynolds-Zahl der Düsenströmung Re_{noz} wird im Wesentlichen durch den Düsendurchmesser D_{noz} und den in der Düse herrschenden Überdruck P_{noz} beeinflusst. Die Reynolds-Zahl der mitgerissenen Strömung Re_p hängt von der Bahngeschwindigkeit W_p und der Höhe des Strömungskanals H ab.

Die Pr-Zahl (Gleichung 29) für Luft ist im betrachteten Temperaturbereich von 20 bis 300 °C mit $\text{Pr} \approx 0.71$ annähernd konstant. So kann man die Pr-Zahl in die Konstante C_{geo2} aus Gleichung 41 integrieren.

Da Konvektionstrockner in der Regel unter gleich bleibendem Druck betrieben werden, ändert sich Re_{noz} (Gleichung 42) nur temperaturbedingt – Viskosität und Dichte der Trocknungsluft sind Funktionen der Temperatur. Wegen der hohen Temperatur herrscht im Trockner eine sehr geringe Sättigung der Trocknungsluft mit Wasserdampf. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Stoffwerte der Trocknungsluft kann deshalb vernachlässigt werden. Definiert man eine Düsenkonstante mit $C_{noz} = C_{geo3} D_{noz} \sqrt{P}$, so wird

$$\text{Re}_{noz} = \frac{C_{noz}}{\nu_{air} \sqrt{\rho_{air}}} \quad (44).$$

Der Ansatz für die Nu-Zahl aus Gleichung 41 vereinfacht sich zu

$$\text{Nu} = C_{geo2} \text{Re}_{noz}^m \text{Re}_p^n \quad (45)$$

Reicht die Güte der Korrelation nach Gleichung 45 nicht aus, so kann dieses Problem durch Einführung eines verallgemeinerten

Produktansatzes behoben werden. Statt den dimensionslosen Kennzahlen selbst führt man an deren Stelle allgemeine Funktionen ein:

$$\text{Nu} = f_1(\text{Re}_p) f_2(\text{Re}_{noz}) \quad (46)$$

In dieser Gleichung stehen $f_i(x)$ für allgemeine Funktionen, die ihrerseits durch einen Reihenansatz

$$f_i(x) = A_i + B_i x + C_i x^2 + \dots \quad (47)$$

mit den Konstanten A_i , B_i usw. approximiert werden können. Gleichungen 46 und 47 ergeben

$$\begin{aligned} \text{Nu} = & \left(A_1 + B_1 \text{Re}_p + C_1 \text{Re}_p^2 + \dots \right) \cdot \\ & \cdot \left(A_2 + B_2 \text{Re}_{noz} + C_2 \text{Re}_{noz}^2 + \dots \right) \end{aligned} \quad (48).$$

3.2.3.4 Bestimmung der Korrelationsparameter für die Wärmeübertragung in Konvektionstrocknern

Die Konstanten C , n , m (Gleichung 45) bzw. A_i , B_i usw. (Gleichung 48) werden aus Messdaten bestimmt. Die Vorgehensweise ist:

1. Erst müssen die Messdaten an der Streichmaschine aufgenommen werden. Sie bestehen aus Bahntemperaturen, die vor und nach dem untersuchten Lufttrockner (siehe z. B. Abbildungen 5.1 und 5.4) aufgenommen werden.

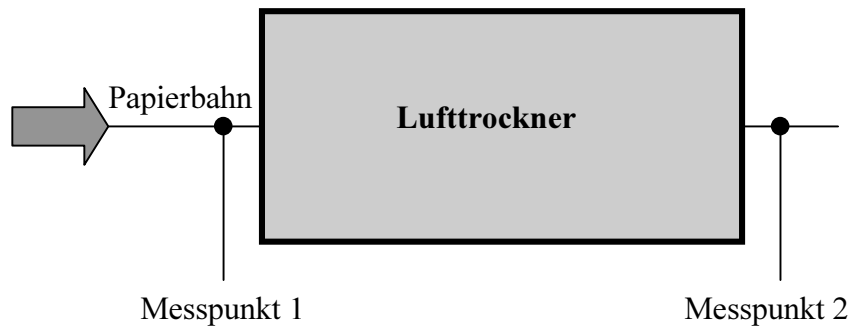


Abbildung 3.7: Messungen an einem Lufttrockner für die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffiziente α in Abhängigkeit von den Betriebsparametern

Diese Prozedur muss in der Regel für jeden einzelnen Trockner durchgeführt werden, der simuliert werden soll. Der Grund dafür ist, dass die Lufttrockner oft über eine sehr individuelle Bauart verfügen oder auf eine sehr spezifische Weise betrieben werden. Dadurch wird die Übertragung einer experimentell bestimmten Korrelation auf einen nicht vermessenen Trockner erschwert.

Lufttrockner werden in der Regel mit dem maximal möglichen Überdruck in den Düsenkammern betrieben. Die Anpassung der Trocknung an die Erfordernisse der Produktion erfolgt durch die Variation der Lufttemperatur T_{air} . Ein anderer Betriebsparameter, der zwar weitgehend unabhängig von der Trocknung eingestellt wird, aber einen starken Einfluss auf die Trocknungsbedingungen hat, ist die Bahngeschwindigkeit W . Bei ihrem Betrieb hat jede Maschine einen beschränkten Bereich, über den die Betriebsparameter T_{air} und W variiert werden können. Die Akquisition der Messdaten muss dem zu Folge auf eine Weise geschehen, die die vollständige Erfassung des Betriebsbereiches ermöglicht. So kann aufgrund der Messdaten eine Korrelation der Wärmeübertragung errechnet werden, die den Betriebsbereich vollständig abdeckt.

Während einer Messreihe werden also idealerweise die Lufttemperatur und die Bahngeschwindigkeit im Lufttrockner schrittweise über eine möglichst breite Spanne verändert. Nach jeder Änderung des Betriebspunktes wird die Bahntemperatur erfasst. Die Messung der Bahntemperatur darf allerdings erst nach dem Eintreten eines stationären Zustandes der Streichmaschine erfolgen. Es ist notwendig, dass die Bahngeschwindigkeit, die Temperaturverhältnisse und das Strichgewicht stabile Werte annehmen. Die Einstellung der Bahngeschwindigkeit verläuft üblicherweise schnell. Allerdings kann, je nach aktuellem Temperaturniveau und je nach Wärmeleistung, die Aufwärmung bzw. Abkühlung des Lufttrockners sehr langwierig werden. Das Erreichen des stationären Laufes nach einer Änderung des Betriebspunktes kann bei Pilot- und Produktionsanlagen einige Minuten, in manchen Fällen sogar mehrere zehn Minuten erfordern.

Die Durchführung der Messungen muss so konzipiert werden, dass durch die Einstellung der Betriebsparameter möglichst nur eine der beiden Re -Zahlen aus Gleichungen 45 oder 48 variiert wird. Dies vereinfacht die Auswertung der eben genannten Gleichungen wesentlich. Durch Änderung der Bahngeschwindigkeit wird nur Re_p beeinflusst, da Re_{noz} davon unabhängig ist. Ändert man nun die Bahngeschwindigkeit und misst die entsprechenden Bahntemperaturen, so gewinnt man die Grundlage für die Berechnung des ersten Satzes an Korrelationsparametern. Dies betrifft die Konstante n aus Gleichung 45 bzw. die Parameter A_I , B_I usw. aus Gleichung 48. In einer zweiten Runde wird die Lufttemperatur systematisch geändert. Dadurch werden beide Re -Zahlen beeinflusst, da man aber die Konstanten für Re_p schon kennt, kann hieraus auf die Werte für die Konstanten von Re_{noz} geschlossen werden.

2. Im zweiten Schritt berechnet man den Wärmeübertragungskoeffizienten α für alle Betriebspunkte aus den aufgenommenen Messreihen. Dies geschieht, indem man α in der Simulation der Streichmaschine so anpasst, dass die Bahntemperaturen aus den Messreihen getroffen werden.
3. Aus den Wärmeübertragungskoeffizienten α werden die „gemessenen“ Nu-Zahlen über Gleichung 30 bestimmt.
4. Zuletzt werden die Nusselt-Beziehungen aus Gleichungen 45 oder 48 durch Anpassung der Konstanten berechnet. Wie im Punkt 1 beschrieben, werden zuerst n bzw. A_1 , B_1 usw. aus der Gegenüberstellung der unter Änderung der Bahngeschwindigkeit aufgenommenen Nu-Zahlen und den zugehörigen $Re_p(W_p)$ ermittelt. Re_{noz} wird dabei durch gleich bleibende Lufttemperatur im Trockner konstant gehalten. Erst danach können die restlichen Konstanten m und C_{geo2} bzw. A_2 , B_2 usw. für $Nu = f(Re_p, Re_{noz})$ bei gleich bleibender Bahngeschwindigkeit berechnet werden. Dies geschieht durch das Auftragen von $\frac{Nu}{C_{geo2} Re_p^n}$ bzw. $\frac{Nu}{f_1(Re_p)}$ über Re_{noz} . Das Korrelieren in dieser Form kann mittels einer Tabellenkalkulation durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Korrelation werden hier exemplarisch am Beispiel eines HPC-Lufttrockners (High Pressure Convective dryer) der Firma Spooner besprochen. Der Lufttrockner besteht aus jeweils einem Airturn mit Haube am Anfang und Ende. Der eigentliche HPC-Teil befindet sich in der Mitte. Die Gesamtlänge des Moduls beträgt 6.2 m.

Ändert man die Bahngeschwindigkeit W_p zwischen 1000 und 2000 m/min bei 150 °C Lufttemperatur und vollem Betriebsdruck, so kann man das Verhalten aus Abbildung 3.8 beobachten:

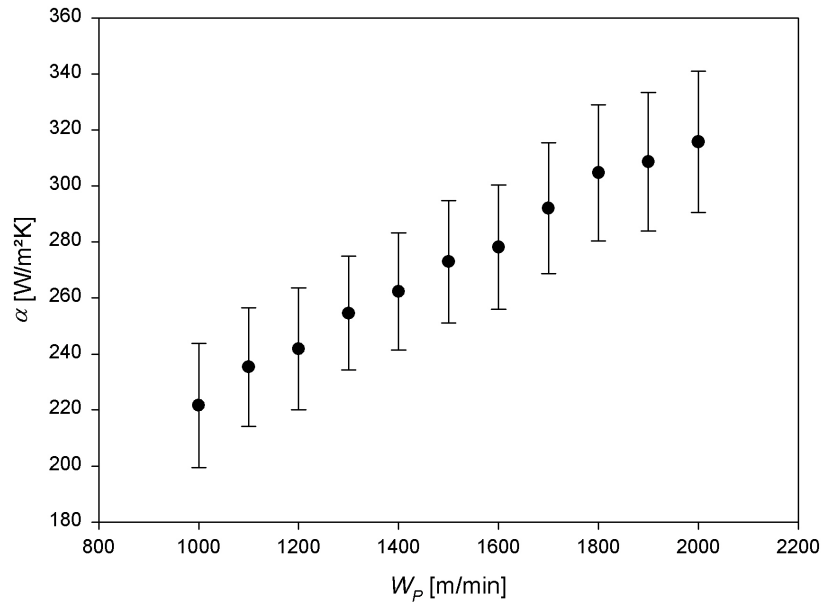


Abbildung 3.8: Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten α mit der Bahngeschwindigkeit W im HPC-Lufttrockner. Die Fehlerbalken stellen den Fehler (10 %) dar, der aus der Genauigkeit der Temperaturmessung (± 3 °C) abgeleitet werden kann.

Die Intensität der Wärmeübertragung erhöht sich in diesem Fall kontinuierlich mit der Geschwindigkeit der Maschine. Der Wärmeübergangskoeffizient α wird gesteigert, indem durch die Steigerung der relativen Geschwindigkeit zwischen Papierbahn und Strömung mehr Turbulenz erzeugt wird. Die Verwendung eines handgeführten Pyrometers für die Erfassung der Bahntemperatur (siehe Abschnitt 4.5) kann einen systematischen Fehler von ± 3 °C verursachen. Dies geschieht wegen der nicht genau bekannten Emissivität der Papierbahn. Die Abweichung in der Bahntemperatur hat bei der Bestimmung der α - und Nu-Zahlen eine Genauigkeit von ca. ± 10 % zur Folge. Da bei $T_{air} = \text{const.}$ im Lufttrockner auch die Kennzahl Re_{noz} aus Gleichung 44 konstant bleibt, kann man die Beziehung $\alpha = f(W_p)$ aus Abbildung 3.8 in die dimensionslose Form

$Nu = f(Re_p)$ transformieren. Dabei entsteht Abbildung 3.9, die einen ähnlichen Verlauf verzeichnet wie Abbildung 3.8. Dies deutet auf eine sogenannte $\alpha - Nu$ - bzw. eine $W_p - Re_p$ - Äquivalenz hin.

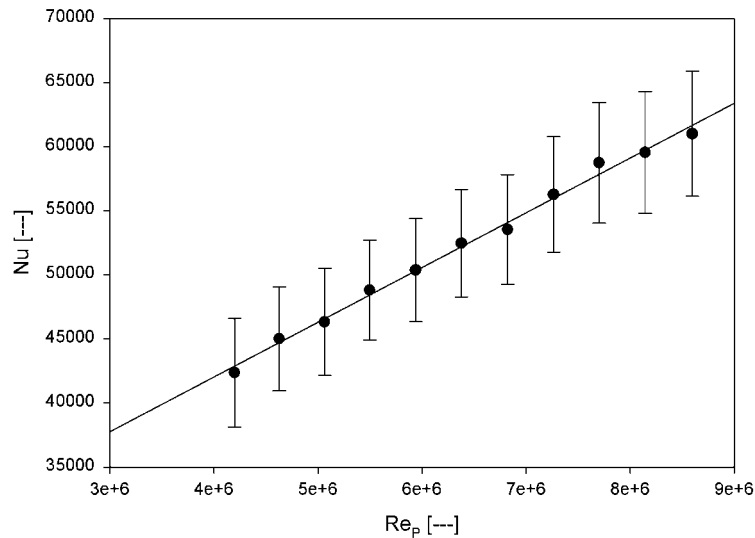


Abbildung 3.9: Lineare Änderung des Wärmeübergangs – dargestellt durch die Nu -Zahl – in Abhängigkeit von $Re_p = Re_p(W)$ im Lufttrockner. Die Fehlerbalken stellen den Fehler (10 %) dar, der aus der Genauigkeit der Temperaturmessung ($\pm 3^\circ C$) abgeleitet werden kann.

Den in der obigen Abbildung dargestellten Sachverhalt kann man durch

$$Nu = 17.137 Re_p^{0.5123} \quad (49)$$

erfolgreich korrelieren.

Wenn man nun wiederum bei einer Messreihe die Bahngeschwindigkeit bei $W = 1000$ m/min festhält und die Lufttemperatur T_{air} ändert, so ergibt sich der Zusammenhang, dass sich der Wärmeübergang durch die Erhöhung der Lufttemperatur verschlechtert (Abbildung 3.10). Eine Erklärung kann man vereinfacht durch die Betrachtung der turbulenten Grenzschicht an einer parallel angeströmten ebenen Platte finden [Sch65]. Dazu wird an dieser Stelle die Stanton-Zahl

$$St = \frac{\alpha}{c_{p,air} \rho_{air} V_{bulk}} = \frac{Nu}{Re Pr} \quad (50)$$

eingeführt, wobei durch V_{bulk} die Bulkgeschwindigkeit der Luft dargestellt wird.

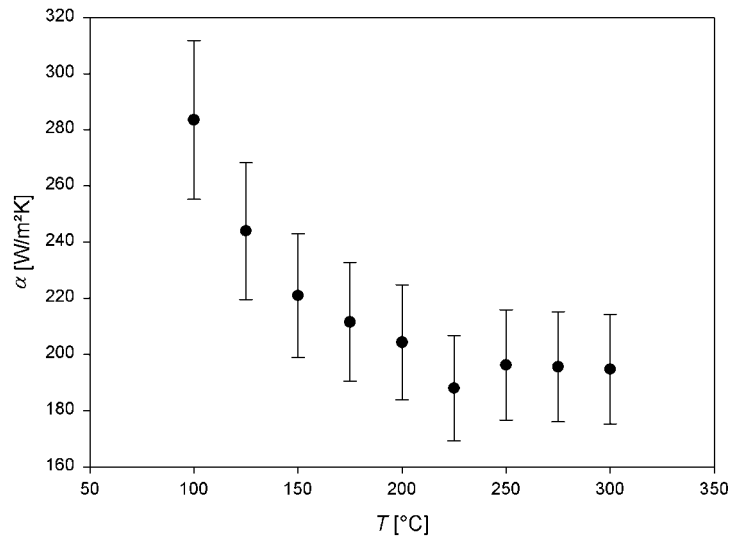


Abbildung 3.10: Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten α mit der Lufttemperatur T_{air} im Lufttrockner. Die Fehlerbalken stellen den Fehler (10 %) dar, der aus der Genauigkeit der Temperaturmessung (± 3 °C) abgeleitet werden kann.

Unter der Zuhilfenahme der Reynolds'schen Analogie [BSL60, Sch98] von Impuls- und Wärmetausch hat man für die Wärmeübertragung

$$Nu = Re \frac{c_f}{2}, \quad (51)$$

mit dem Widerstandsbeiwert

$$c_f \approx 0.06(Re)^{-\frac{1}{5}} \quad (52)$$

für eine glatte ebene Platte. Aus Gleichungen 50 und 51 kann man den Wärmeübertragungskoeffizienten

$$\alpha = c_{p,air} \rho_{air} V_{bulk} \frac{c_f}{2} \quad (53)$$

bestimmen. Setzt man Gleichungen 52 und 53 in die Definition der *Re*-Zahl (Gleichung 28) ein, so erhält man

$$\alpha \approx 0.03 c_{p,air} \rho_{air} V_{bulk} \left(\frac{v_{air}}{L V_{bulk}} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (54)$$

Bei gleich bleibenden Strömungsverhältnissen (d.h. $V_{bulk} = \text{const.}$) erhält man dann

$$\alpha = \text{const} \cdot \rho_{air} v_{air}^{\frac{1}{5}} \quad (55)$$

für den Wärmeübergangskoeffizienten. Da bei der Erhöhung der Lufttemperatur die Dichte ρ_{air} wesentlich rascher abnimmt als die fünfte Wurzel der kinematischen Viskosität v_{air} ansteigt, erhält man eine fallende Kurve $\alpha = f(T_{air})$, wie in Abbildung 3.10. Um Missverständnisse zu vermeiden, muss man an dieser Stelle jedoch deutlich stellen, dass trotz fallendem α die übertragene Wärmestromdichte \dot{q}_{conv} mit der Lufttemperatur steigen wird.

Will man nun die Bestimmung der Nu-Parameter bezogen auf die Re_{noz} -Zahl (n bzw. A_I , B_I usw.) vornehmen, so muss zuerst der Re_p -Anteil aus der Nu-Beziehung eliminiert werden. Dadurch erhält man eine reduzierte Nu-Zahl

$$Nu_{red} = \frac{Nu}{C_2^{geo} Re_p^n} = Re_{noz}^m \quad (56)$$

aus Gleichung 45 oder entsprechend

$$\text{Nu}_{red} = \frac{\text{Nu}}{f_1(\text{Re}_p)} = A_2 + B_2 \text{Re}_{noz} + C_2 \text{Re}_{noz}^2 + \dots \quad (57)$$

aus Gleichung 48. Um eine Korrelation für die Abhängigkeit der Nu-Zahl von der Temperatur im Lufttrockner aufstellen zu können, wird die $\alpha = f(T_{air})$ -Beziehung aus Abbildung 3.10 in die neue Form $\text{Nu}_{red} = f(\text{Re}_{noz})$ umgewandelt.

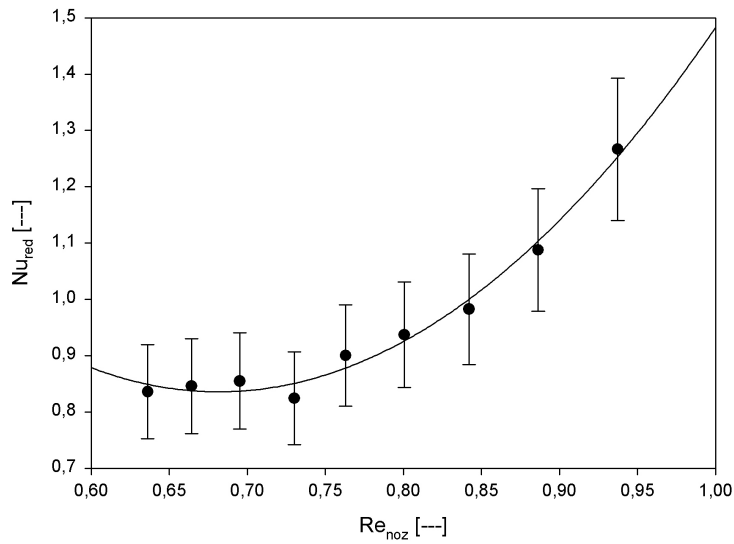


Abbildung 3.11: Änderung der Nu_{red} -Zahl mit der Lufttemperatur, dargestellt über die Beziehung $\text{Re}_{noz} = \text{Re}_{noz}(T_{air})$ im Lufttrockner. Die Fehlerbalken stellen den Fehler (10 %) dar, der aus der Genauigkeit der Temperaturmessung ($\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) abgeleitet werden kann.

Die Messpunkte in der Beziehung $\text{Nu}_{red} = f(\text{Re}_{noz})$ können in diesem Fall durch den Potenzansatz aus Gleichung 56 nicht richtig abgebildet werden. Daher muss hier Gleichung 57 verwendet werden. Man erhält:

$$\text{Nu}_{red} = 6.462 \text{Re}_{noz}^2 - 9.021 \text{Re}_{noz} + 4.033 \quad (58)$$

Die Gesamtkorrelation für die Nu-Zahl wird dadurch aus Gleichungen 49 und 58 zu

$$\text{Nu} = 17.137 \text{Re}_p^{0.5123} (6.462 \text{Re}_{noz}^2 - 9.021 \text{Re}_{noz} + 4.033) \quad (59).$$

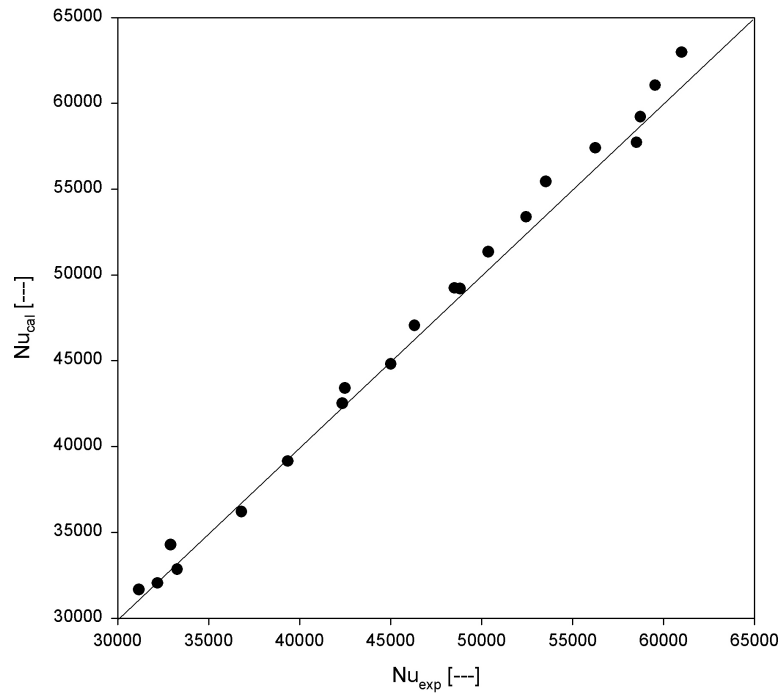


Abbildung 3.12: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Nu-Zahlen (Nu_{exp} und Nu_{cal})

Wie aus der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Nu-Zahlen Nu_{exp} und Nu_{cal} in Abbildung 3.12 zu sehen ist, wurden die experimentell bestimmten Werte durch den gemischten Ansatz aus Gleichung 59 gut wiedergegeben.

3.2.4 Wärmeübertragung durch Strahlung

Quellen der IR-Strahlung bei der Trocknung gestrichener Papiere sind IR-Trocknungsmodule und Heißlufttrockner. Die in den freien Zügen auftretende Abstrahlung des Papiers wird wegen der geringen Temperaturunterschiede zwischen Bahn und Umgebung vernachlässigt. Für die Berechnung der vom gestrichenen Papier absorbierten Strahlung gibt es in der Literatur mehrere Ansätze.

Das integrale Modell [Hei92, FLO91] sieht vor, dass die Strahlung über dem gesamten Papierquerschnitts gleichmäßig aufgenommen wird. Das Exponential- und das Schichtenmodell dagegen gehen davon aus, dass die Absorption in Richtung der Einstrahlung allmählich abnimmt. Dies bedeutet wiederum eine stärkere Aufwärmung der angestrahlten Oberfläche im Vergleich zur Rückseite der Papierbahn.

Dem Exponentialmodell liegt das Lambert-Beer'sche Gesetz zugrunde [FLO91, KrK92, KTG94, KTC95, SSR00], dass die IR-Absorption in Strahlungsrichtung exponentiell abnimmt:

$$\dot{q}_{IR}(x) = \dot{q}_{IR,em} (1 - r) e^{-ax} \quad (60)$$

Die ausgestrahlte Wärmestromdichte $\dot{q}_{IR,em}$ erfährt beim Durchlaufen eines homogenen Mediums eine Abschwächung durch Reflexion r auf der Oberfläche und durch Absorption a über die Schichtdicke x .

Das Schichtenmodell (siehe [ScB72, ScB74, Oja93, PeS98, PeS98a, Pet99]) unterteilt den Querschnitt von gestrichenem Papier in mehrere Unterschichten. Die Abgrenzung der Unterschichten ist rein imaginär – ein Rohpapier von 80 g/m² kann so z. B. in 20 Schichten von 4 g/m² unterteilt werden. Die Anzahl der Schichten wird so zum

Anpassungsparameter. In den Unterschichten erfährt die Strahlung bei ihrem Durchgang Absorption, Reflexion und Transmission in unterschiedlichem Maße. Dies je nach Wellenlänge der Strahlung und Feuchtigkeit bzw. Zusammensetzung der einzelnen Schichten. Dadurch werden Energiedichte und Absorption bei dem Durchgang der IR-Strahlung durch die Papierbahn abgeschwächt. Das Schichtenmodell unterscheidet sich vom Exponentialmodell, indem es die Reflexion an den einzelnen Unterschichten des Papiers – makroskopisch gesehen die Streuung im Papier – berücksichtigt.

Das Exponential- und das Schichtenmodell berücksichtigen also die unterschiedliche Absorptionsverteilung durch graduelle Abschwächung der IR-Strahlung in Dickenrichtung des Papiers. Diese Modelle erfordern aber eine hinreichend differenzierte Stoffdatenbasis in Form von spektralen Eigenschaften. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die spektralen Eigenschaften von Papier und Strich von Fall zu Fall stark variieren können [PeS98, Pet99] und im Einzelnen nicht bekannt sind. Dadurch wird die Auswertung dieser Systeme deutlich erschwert und ihre Genauigkeit reduziert. Außerdem konnten für die untersuchten dünnen LWC-Papiere mit der verwendeten Messtechnik (handgeführter IR-Pyrometer, siehe Abschnitt 4.5) keine nennenswerten Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Seiten der Papierbahn, d.h. über die Papierdicke, registriert werden. So sind die potentiellen Vorteile des Exponential- und des Schichtenmodells gegenüber der integrale Betrachtungsweise nicht mehr von Bedeutung. Die Temperaturdifferenzen, die durch ungleichmäßige IR-Aufnahme entstehen könnten, werden durch Wärmeleitung schnell ausgeglichen. Über den Papierquerschnitt herrscht auf diese Weise annähernd die gleiche Temperatur. Man kann an dieser Stelle ein einfaches integrales Modell der IR-Absorption verwenden, obwohl die Strahlung über dem Papierquerschnitt nicht gleichmäßig aufgenommen wird. Bei der obigen Ausführung ist anzumerken, dass die für LWC getroffenen Annahmen

ihre Gültigkeit für schwerere Papiersorten verlieren. Dort haben die beiden detaillierten Modelle ihre Berechtigung.

Zur Berechnung der vom IR-Modul emittierten Wärme werden Strahler und Papier als zwei gegenüberliegende, parallele ebene Flächen modelliert und beide als graue Strahler angenommen [BaS94]. Die vom Emitter Richtung Papierbahn ausgestrahlte Wärmestromdichte beträgt

$$\dot{q}_{IR,em} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{CP}} + \frac{1}{\varepsilon_{em}} - 1} (T_{em}^4 - T_{CP}^4) \quad (61).$$

Die Temperatur T_{em} des Emitters von gasbeheizten IR-Modulen, die in der vorliegenden Arbeit betrachtet wurden, liegt nach Herstellerangaben im Bereich von 900 bis 1200 °C. Bei den Lufttrocknern wird die IR-Strahlung von den heißen Innenwänden emittiert. Die Wände nehmen im stationären Zustand die Lufttemperatur an, so dass dort $T_{em} = T_{air}$ gilt. Der Emissionsgrad für die Papierbahn beträgt $\varepsilon_{CP} = 0.95$ bis 0.98 [Hei92, Oja93, Pet99]. Für den Emitter eines IR-Moduls kann man $\varepsilon_{em} = 0.6$ bis 0.8 ansetzen [Oja93, StJ95, SLA95, SLA96, LAS96, Bed98, MGV98, Pet99]. Die heißen Wände eines Lufttrockners strahlen dagegen mit Emissionsgraden von zwischen ca. 0.25 für blanken Stahl und 0.8 bei Rost [VDI84].

Die anhand von Gleichung 61 berechnete Wärmestromdichte wird im praktischen Fall seitens der Papierbahn nicht vollkommen absorbiert, da die Bahn gegenüber der IR-Strahlung semitransparent erscheint. Zusätzlich muss man berücksichtigen, dass nicht die Gesamtheit der emittierten Strahlung auf das gestrichene Papier trifft. Ein Teil entweicht auf die Ummantelung des Trockners und in die Umgebung. Die Tatsache, dass nur ein Teil der Strahlungswärme vom Papier aufgenommen wird, kann durch den Wirkungsgrad η_{IR}

$$\dot{q}_{IR} = \eta_{IR} \dot{q}_{IR}^{em} \quad (62)$$

berücksichtigt werden.

3.2.5 Kontakt-Wärmeübertragung

Bei der Trocknung von gestrichenem Papier mit beheizten Zylindern erscheint im Unterschied zu berührungsloser Trocknung der Kontakt-Wärmestromdichte \dot{q}_{cont} zwischen Zylinderoberfläche und Papierbahn in der Wärmebilanz. Dieser Term der Wärmebilanz berechnet sich nach [Ram90, Hei92] zu

$$\dot{q}_{cont} = \alpha_{cont} (T_{CS} - T_{CP}) \quad (63).$$

Dabei kann näherungsweise angenommen werden, dass die Temperatur der Zylinderoberfläche T_{CS} über den gesamten Zylinderumfang konstant bleibt [ViL82]. Der Wertebereich für T_{CS} liegt zwischen 80 und 120 °C. Der Wärmeübergangskoeffizient α_{cont} wird Kontaktkoeffizient genannt. Er wird aufgrund der Unvollkommenheit des Papier-Zylinder-Kontaktes notwendig, da beide Oberflächen uneben und evtl. verunreinigt sind. Außerdem befindet sich zwischen Papier und Zylinder ein dünner Luftfilm, der isolierend wirkt. Die Kontaktfläche stellt also einen Widerstand zum Wärmetransport dar, dessen Wert nur schwer vorhersagbar ist, da er von vielen Faktoren abhängt [HTK00]. Diese sind die Bahnfeuchte, die Anpresskraft zwischen Bahn und Zylinder, der Zustand des isolierenden Luftfilms zwischen Bahn und Zylinder, die Rauigkeit und Verunreinigung der Oberflächen und die Wärmeleitfähigkeit der Papierbahn.

Der Wert von α_{cont} wächst mit zunehmender Bahnfeuchte und zunehmender Spannkraft im Filz oder in der Bahn. Da sich in der Regel zwischen Zylinder und Papierbahn eine dünne Luftschicht befindet, die isolierend wirkt, steigt α_{cont} mit der Erhöhung der Porosität durch einen schnelleren Abbau des Luftpolsters. Analog dazu sinkt α_{cont} bei höheren Rauigkeiten oder Bahngeschwindigkeiten W , da diese die Ausbildung vom Luftfilm begünstigen.

In der Literatur wurden sehr unterschiedliche Werte für den Kontaktkoeffizienten bestimmt (siehe [RhG79, LeH82, HTK00]). α_{cont} liegt im Bereich von 100-700 W/m²K für bespannte Zylinder bei den für gestrichenes Papier üblichen Bahnfeuchten. Die oben genannte Literatur gilt allerdings für ungestrichene Papiere. In [Hei92] findet man erstmalig Messungen für gestrichenes Papier, durchgeführt an Produktionsmaschinen: Die Werte für α_{cont} befinden sich demnach im Bereich von 300-500 W/m²K für bespannte Zylinder, ohne Filz sogar darunter (50-150 W/m²K).

3.3 Stofftransport

In diesem Kapitel wird die Bewegung der Feuchtigkeit im einfach gestrichenen Papier und über die Systemgrenzen hinweg beschrieben. Das Bilanzieren des Stofftransports erfolgt bezogen auf die einzelnen materiellen Zonen, wie sie oben definiert wurden. Die dabei vorkommenden Transportmechanismen sind die Penetration und die Verdunstung. Durch Penetration wird die Feuchtigkeit aufgrund der kapillaren Saugkraft des Rohpapiers in flüssiger Form innerhalb des Systems verlagert [Bau80, Sal88]. Die Verdunstung transportiert dagegen Wasserdampf in die Umgebungsluft. Beide Mechanismen vollziehen sich abhängig vom Zustand und von der Struktur der durch Transport betroffenen materiellen Zonen.

3.3.1 Struktur des gestrichenen Papiers

Der Stofftransport im gestrichenen Papier steht im engen Zusammenhang mit der Struktur von Rohpapier und Strich. Die trocknungsrelevante strukturelle Beschaffenheit des Rohpapiers bleibt weitgehend unverändert. Im Gegensatz dazu ändern sich die Eigenschaften des zu Beginn der Trocknung noch flüssigen Striches während seiner Verfestigung und Austrocknung. Er verliert seine Wasserreserven durch Penetration und Verdunstung und erfährt eine Transformation zum porösen Festkörper. Die bei der Verfestigung entstehende Mikrostruktur bestimmt die Transporteigenschaften der Strichschicht. Eine Literaturübersicht über die Verfestigung der Streichfarbe gibt Lepoutre [Lep89]. Die Strukturbildung kann in drei Abschnitte unterteilt werden [WaL82]. Die Streichfarbe befindet sich im flüssigen Zustand, solange sich ihre Feuchte über einem ersten kritischen Punkt FCC (first critical concentration) bei ca. 73 % Feststoffgehalt befindet [StL96, StL96a]. Danach verfestigt sich der Strich allmählich bis zum Erreichen des zweiten kritischen Punktes SCC (second critical concentration) bei ca. 80 bis 85 % Feststoffgehalt. Der SCC wird in dieser Arbeit auch Immobilisierungspunkt genannt. Nach dem SCC ist der Strich vollständig immobilisiert und erreicht seine endgültige Struktur.

Der noch flüssige Strich wird in dieser Arbeit bis zum Erreichen des Immobilisierungspunktes als eine homogene Schicht modelliert [Hei92, FLO91]. Gradienten der Feuchte in Dickenrichtung, wie sie bei Toivakka [ToE95, Toi97] durch partikeldynamische Simulation vorhergesagt werden, bleiben hier außer Acht, da sie mit der vorhandenen Messtechnik nicht erfasst werden können. Ein weiterer Grund für diese Vereinfachung ist die Annahme, dass die Verdunstung vor dem Immobilisierungspunkt wie von einer freien Wasseroberfläche erfolgt. Die Oberfläche des Striches muss dafür nicht vollständig von Wasser benetzt sein – eine Reihe fein verteilter Ver-

dunstungsquellen erfüllen schon diese Voraussetzung [Sch88, Sch88a]. Da außerdem die Penetration nach der Strichauftragung erst nach dem Immobilisierungspunkt aufhört [EnR86], wird im Folgenden nur mit dieser kritischen Konzentration gearbeitet.

Am Immobilisierungspunkt erreicht der Strich seine endgültige Porenstruktur. Im darauf folgenden Abschnitt der Streichmaschine werden die wassergefüllten Porenräume des Striches durch Verdunstung geleert. Der Trocknungsspiegel zieht sich dabei von der Oberfläche ins Strichinnere zurück. Die Dampfdiffusion durch eine poröse Schicht wird zum dominanten Mechanismus der Stoffübertragung über die freie Strichoberfläche, ebenso wie die papierseitige Verdunstung aus dem Strich.

Die aus dem Penetration stammende Wassermenge wird in der Nähe der Strich-Rohpapier-Grenzfläche akkumuliert. Die Fasermatrix des Papiers wird dabei als unverändert angenommen. Von dieser aufgefeuchteten Papierschicht aus erfolgt dann die Verdunstung durch das trockene Rohpapier und, falls es die Partialdruckgradienten erlauben, durch den schon relativ trockenen Strich. Die trockene Partie des Rohpapiers steht auch im Stoffaustausch mit der Umgebung. Allerdings erfolgt der Transport aus dieser Schicht ausschließlich papierseitig, da der Strich und die darunter liegende Bereiche in der Regel eine höhere Feuchte aufweisen als das trocken gebliebene Rohpapier.

Die Berechnungsprozedur wurde bei ihrer Entwicklung möglichst einfach gehalten. Daher wurden einige, für die Trocknung nicht relevanten strukturellen Vorkommnisse in der Streichveredelung bei der Modellbildung vernachlässigt. So bleibt das Eindringen der Strich-Feststoffe in das Rohpapier und die dadurch entstehende Mischschicht [SDL95, DiL97] unberücksichtigt. Ebenso wird beim Modellieren die mikro- und makroskopische Deformation des Rohpapiers bei der Wiederauffeuchtung beim Strichauftrag, wie z. B.

Aufrauung, Wellenbildung, Ausdehnung der Bahn etc., außer acht gelassen [SkL85, GaH89, Sko90, EIO92, AsB94, EnR94, SNR95, HuL96, For97, GrA98, EnL98].

3.3.2 Massenbilanz

Die Bilanzierung des Stofftransports wird für jede materielle Zone des gestrichenen Papiers einzeln durchgeführt. Dabei ist Wasser als Flüssigkeit oder Dampf die einzig relevante transportierte Komponente im System. Bei der Trocknung gestrichener Papiere wird Feuchtigkeit aus dem Strich ins Rohpapier durch Penetration (\dot{m}_{pen}) und zwischen den Einzelnen Modellzonen bzw. in die Umgebung durch Transport von Wasserdampf (\dot{m}_V) übertragen.

Die Bahntemperatur wird bei der Trocknung von gestrichenem Papier in der Regel deutlich unter der Siedetemperatur des Wassers gehalten. Deshalb erfolgt der Transport von Wasserdampf durch Verdunstung und Dampfdiffusion.

Die aus dem Strich durch Penetration entfernte Flüssigkeit \dot{m}_{pen} (siehe Abbildung 3.13) wird in einer dünnen Grenzschicht des Papiers unmittelbar unter dem Strich aufgenommen (befeuchtetes Rohpapier, Index mP). Die Modellzone trockenes Rohpapier (Index dP) wird von der Penetration nicht beeinflusst. Außerdem wird dem Strich Wasser in Dampfform durch Verdunstung \dot{m}_V entzogen. Ein Verdunstungsstrom aus dem Strich (Index C) gelangt über seine freie Oberfläche in die Umgebungsluft ($\dot{m}_{V,C}$). Zusätzlich besteht zwischen Strich und befeuchtetem Rohpapier ein Dampftransport ($\dot{m}_{V,C/mP}$). Ein Teil des Dampfstroms aus dem befeuchteten Rohpapier gelangt außerdem in die trockene Papierschicht ($\dot{m}_{V,mP/dP}$).

Der Feuchtetransport aus der trockenen Partie des Rohpapiers in die papierseitige Umgebungsluft ereignet sich durch einseitige Dampfdiffusion ($\dot{m}_{V,dP}$).

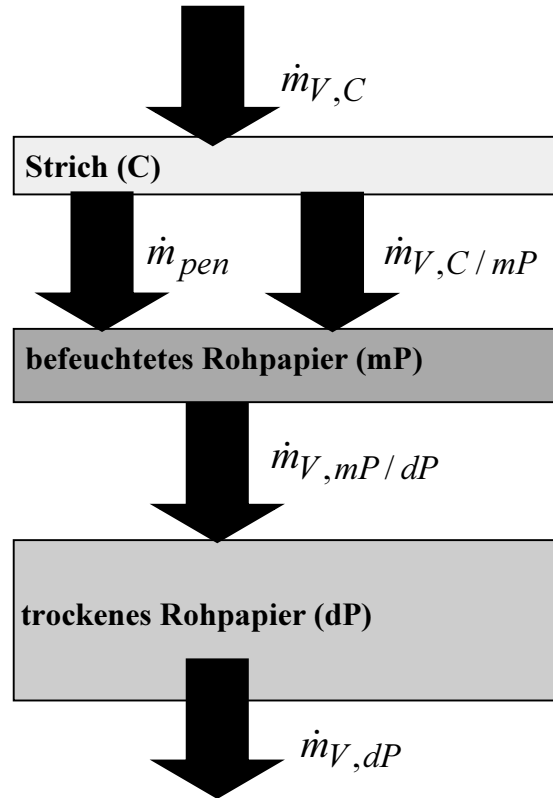


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung von Stofftransport im einfach gestrichenen Papier

Die Bilanz der Feuchte X für die drei modellierte Zonen (Abbildung 3.1) wird aufgrund der oben dargestellten Massenströme (Abbildung 3.13) und der materiellen Bilanzgleichung 4 aufgestellt:

$$\rho_C \dot{X}_C + (-\dot{m}_{V,C} + \dot{m}_{V,C}/mP + \dot{m}_{pen}) = \sigma_{X,C} \quad (64)$$

$$\rho_{mP} \dot{X}_{mP} + (-\dot{m}_{V,C}/mP + \dot{m}_{V,mP}/dP) = \sigma_{X,mP} \quad (65)$$

$$\rho_{dP} \dot{X}_{dP} + (-\dot{m}_{V,mP}/dP + \dot{m}_{V,dP}) = \sigma_{X,dP} \quad (66)$$

Während der Trocknung gestrichener Papiere spielen sich näherungsweise keine chemische Reaktionen ab. Sorption wird in dieser Arbeit als rein physikalischer Prozess betrachtet. Wasser kann also weder entstehen, noch verschwinden. So werden die Wasser-Quellterme σ_X aller Modellzonen in Gleichungen 64 bis 66 zu Null gesetzt. Verwendet man statt der Dichte ρ nun das Flächengewicht der Trockenmasse $m_{i,dry}$ bei der Beschreibung der i -ten Modellzone, so gelangt man zu den Bilanzgleichungen

$$m_{C,dry}\dot{X}_C = \dot{m}_{V,C} - \dot{m}_{V,C/mP} - \dot{m}_{pen} \quad (67),$$

$$m_{mP,dry}\dot{X}_{mP} = \dot{m}_{V,C/mP} - \dot{m}_{V,mP/dP} \quad (68),$$

$$m_{dP,dry}\dot{X}_{dP} = \dot{m}_{V,mP/dP} - \dot{m}_{V,dP} \quad (69).$$

Man nimmt nun an, dass es in den einzelnen Modellszonen nicht zur Speicherung von Feuchtigkeit kommt, d. h. dass sie in der Streichmaschine eher austrocknen als wieder auffeuchten. So werden die Massenströme aus Abbildung 3.13 neu definiert. Nach dem vereinfachten Modell (Abbildung 3.14) haben alle Verdunstungsströme ihren Anfangspunkt in den einzelnen Modellzonen (siehe Abbildung 3.1) und richten sich unmittelbar in die Umgebungsluft.

Die Verdunstung aus dem Strich erfolgt entweder über die freie Oberfläche ($\dot{m}_{V,C}$) oder durch einer Diffusion über das Rohpapier ($\dot{m}_{V,C/P}$). Der Dampfstrom aus dem befeuchtetem Rohpapier muss je nach Richtung die Diffusionswiderstände der trockenen Papierschicht ($\dot{m}_{V,mP/dP}$) bzw. des Striches ($\dot{m}_{V,mP/C}$) überwinden. Der Feuchtetransport aus der trockenen Partie des Rohpapiers ereignet sich durch einseitige Dampfdiffusion durch die Schicht selbst ($\dot{m}_{V,dP}$). Dieser Massenstrom kann in die andere Richtung nicht er-

folgen, da er dann Bereiche hoher Feuchte durchqueren und einen Weg gegen den Feuchtegradienten nehmen müßte.

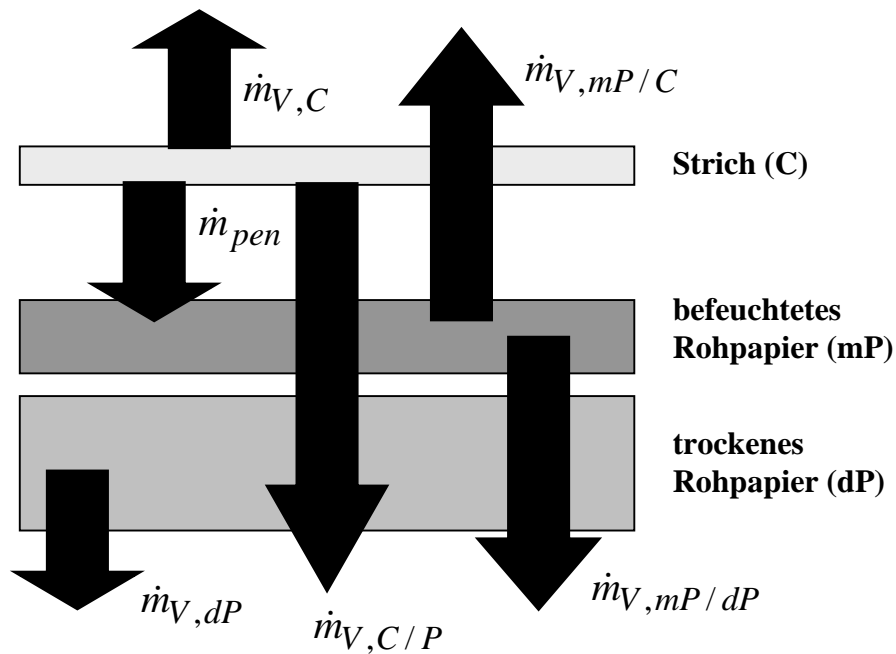


Abbildung 3.14: Schematische Darstellung von Stofftransport im einfach gestrichenen Papier – vereinfachtes Modell

Durch die obigen Betrachtungen nimmt die Massenbilanz (Gleichungen 67-69) die neue Form

$$m_{C,dry} \dot{X}_C = -\dot{m}_{V,C} - \dot{m}_{V,C/mP} - \dot{m}_{pen} \quad (70)$$

$$m_{mP,dry} \dot{X}_{mP} = \dot{m}_{pen} - \dot{m}_{V,mP/C} - \dot{m}_{V,mP/dP} \quad (71)$$

$$m_{dP,dry} \dot{X}_{dP} = -\dot{m}_{V,dP} \quad (72)$$

an. Dabei wird der Massenstrom $\dot{m}_{V,mP/dP}$ neu definiert (vergleiche Abbildungen 3.13 und 3.14). Die Lösung des Gleichungssystems 70 bis 72 erfolgt explizit, da die einzelnen Massenströme alle modelliert werden können.

3.3.3 Penetration

Im Streichaggregat wird die Streichfarbe – eine Suspension mit hohem Wasseranteil – auf das trockene Rohpapier aufgetragen. Durch den Kontakt der beiden Medien beginnt die sogenannte Penetration: Die Flüssigkeit aus der Streichfarbe sickert in die Oberflächenschicht des Papiers. Die Penetration hört erst auf, wenn entweder das Rohpapier mit Flüssigkeit gesättigt wird oder die Reserven an frei beweglicher Flüssigkeit im Strich erschöpft sind. In der Praxis sind die Flüssigkeitsreserven im Strich zu gering, als dass eine Sättigung des Rohpapier durch sie hervorgerufen werden könnte. Die Penetration wird also am Immobilisierungspunkt der Streichfarbe aufhören, wenn im Strich keine mobile Flüssigkeit mehr vorhanden ist.

Die durch Penetration übertragene flüssige Phase, auch Serum genannt, besteht aus Wasser und wasserlöslichen bzw. fein dispergierten Stoffen (z. B. Latex, Stärke und Carboxymethylzellulose). Da die festen Bestandteile der Streichfarbe auf der Strich-Papier-Grenzfläche hängen bleiben, entsteht dort ein Filterkuchen. Die Dicke dieser verfestigten Schicht nimmt mit fortwährendem Flüssigkeitstransport immer weiter zu. Daher entsteht ein Druckabfall bei der Durchströmung des Filterkuchens. Die Dynamik der Entwässerung aufgrund der Penetration ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen dem Druckabfall und den treibenden Kräften [Sal88]. Die freie Penetration wird durch die kapillare Saugkraft des Rohpapiers verursacht [LeE93, LeE93a, Hei92, LeE96, Sta96, ErR94, Let97, WiH97, BWH97]. Zu den zusätzlichen treibenden Kräften zählen der vom Streichaggregat herrührende dynamische Druck [LeD96, LeD93a] und der Dampfdruckgradient bei einem Transport durch bahninterne Verdunstung und Rekondensation [ABK00, BAK00].

Außerdem haben folgende Parameter des gestrichenen Papiers einen wesentlichen Einfluss auf die Penetration:

- Bahntemperatur, über ihren Einfluss auf die Viskosität und Permeation der flüssigen Phase,
- Oberflächeneigenschaften des Papiers (Kontaktwinkel),
- Kapillarstruktur des Rohpapiers,
- Kapillarstruktur bzw. Permeabilität des Filterkuchens auf der Strich-Papier-Grenzfläche,
- Wasserrückhaltevermögen des Striches (Retention) und
- Feststoffgehalt der Streichfarbe bei der Auftragung.

In der unten stehenden Abhandlung wird ausschließlich die freie Penetration nach dem Austritt aus dem Coater betrachtet, da das physikalische Geschehen im Coater experimentell nicht zu erfassen ist.

3.3.3.1 Die Lucas-Washburn-Gleichung

Für die Berechnung der Penetration von Serum aus dem Strich verwendet man meistens die Lucas-Washburn-Gleichung 75. Sie entspringt der instationären Bernoulli-Gleichung [Spu96, ZTH00]

$$\rho \left(x\ddot{x} + \frac{1}{2} \dot{x}^2 \right) = \frac{2}{R} \sigma \cos \theta - \frac{8}{R^2} \eta x \dot{x} - \rho g x \quad (73)$$

für das Steigen einer Flüssigkeit entlang der x -Koordinate in einer vertikalen zylindrischen Kapillare mit dem Radius R (siehe Abbildung 3.15). Die obige Gleichung gilt für newtonsche Fluide mit der dynamischen Viskosität η , der Dichte ρ und der Oberflächen-

spannung σ . θ ist der Benetzungswinkel, g die Erdbeschleunigung.

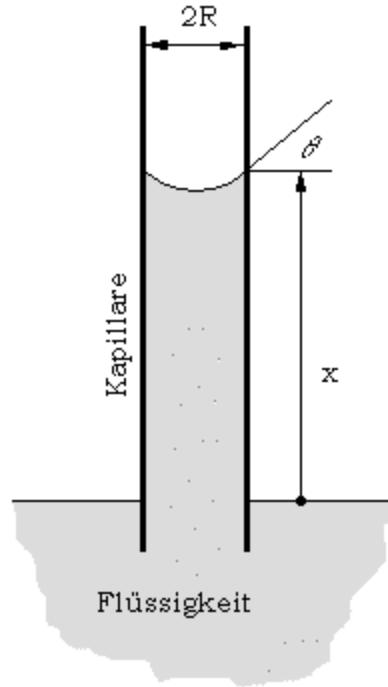


Abbildung 3.15: Steigen einer Flüssigkeit entlang der x -Koordinate in einer vertikalen zylindrischen Kapillare mit dem Radius R . Der Kontaktwinkel zwischen der Flüssigkeit und der Wand wird mit θ bezeichnet.

Weiterhin nimmt man eine stationäre, langsame, laminare Strömung an und erhält eine vereinfachte Differentialgleichung:

$$0 = \frac{2}{R} \sigma \cos \theta - \frac{8}{R^2} \eta x \dot{x} - \rho g x \quad (74)$$

Die asymptotische Kurzzeitleösung der kapillaren Steighöhe $x(t)$ ergibt die sog. Lucas-Washburn-Gleichung:

$$\lim_{t \rightarrow 0} x(t) = \sqrt{\frac{R \sigma \cos \theta}{2 \eta} t} \quad (75)$$

Zu einem Penetrationsmodell in Form der obigen Gleichung kommt man auch auf anderem Wege [Hei92, LeE93, LeE93a]: Bei hydrophilen Rohpapieren kann man annehmen, dass die kapillare Saugkraft das hauptsächliche treibende Potential für die Penetration darstellt [DSG86, ChS90]. Indem das Rohpapier Flüssigkeit aus dem Strich entzieht, entsteht an der Grenzfläche der beiden Medien ein Filterkuchen, dessen Dicke z proportional der insgesamt durchgesickerten Flüssigkeitsmenge m_{pen}

$$z = C m_{pen} \quad (76)$$

ist. Die Streichfarbenschicht oberhalb des Filterkuchens behält dabei ihre Feuchtigkeit im vollen Umfang. Dem antreibenden Kapillardruck wirkt ein Strömungswiderstand (Druckverlust ΔP) entgegen, der bei der Durchströmung \dot{m}_{pen} des Filterkuchens und der penetrierten Papierschicht entsteht. Die so erhaltene laminare Strömung durch das poröse Medium kann mit Hilfe der Darcy-Gleichung

$$\Delta P = \frac{1}{K} \dot{m}_{pen} z \frac{\eta_{ser}}{\rho_{ser}} \quad (77)$$

beschrieben werden [Ung88]. Durch K wird die spezifische Leitfähigkeit der durchströmten Bereiche beschrieben. Mit Gleichung 76 ergibt sich daraus für geringe Penetrationstiefen $z \rightarrow 0$

$$\dot{m}_{pen} m_{pen} = C_{pen} \quad (78).$$

Diese Gleichung entspricht von Form her der Lucas-Washburn-Gleichung. Ein zusätzlicher Einflussfaktor ist die Abhängigkeit der in Gleichung 77 vorkommenden Serum-Viskosität η_{ser} von der Temperatur. Man kann das tendenzielle Verhalten von $\eta_{ser}(T)$

durch das Verhalten von Wasser abbilden ([Hei92], Abschnitt 3.5.4). Führt man die Änderung der Viskosität aus Gleichung 77 in Gleichung 78 ein, so ergibt sich

$$\dot{m}_{pen} = \frac{C_{pen}}{m_{pen}} \frac{\eta_W(T_0)}{\eta_W(T)} \quad (79).$$

In der Simulation der Trocknung wird oft eine Lösung der obigen Gleichung für die Anfangsbedingung $m_{pen}(t=0)=0$ kg H₂O/m² verwendet [Hei92, LeE93, LeE93a]:

$$m_{pen} = \sqrt{\frac{2C_{pen}}{\eta_W(T)/\eta_W(T_0)}} t \quad (80)$$

Die vom Zeitpunkt $t=0$ an penetrierte Serum-Gesamtmenge m_{pen} wird hier als explizite Funktion der Zeit beschrieben. Der experimentell bestimmte Anpassungsparameter C_{pen} hängt hauptsächlich von der Viskosität des Serums und von der Permeabilität des Filterkuchens ab. Die Serumviskosität ist wiederum vom Anteil und Art des Verdickers im Strich abhängig. Die Permeabilität des Filterkuchens wird durch die Packungsdichte der Pigmentpartikel im Filterkuchen bestimmt [SRP95].

Gegenüber der Anwendung der Lucas-Washburn-Gleichung als Modell für die freie Penetration kann in drei wesentlichen Punkten Kritik geäußert werden:

1. Die Verteilung der penetrierten Flüssigkeit im Rohpapier war bisher weitgehend ungeklärt. Es wurde angenommen, dass sich die penetrierte Flüssigkeit gleichmäßig über den gesamten Papierquerschnitt verteilt [Hei92].
2. Die Lucas-Washburn-Gleichung beschreibt die Penetration aus einem unendlich dicken Strich, obwohl die Streichfarbe

in sehr dünnen Schichten auf das Rohpapier aufgetragen wird. Die Penetration klingt nach Gleichung 80 mit der Zeit erst für $t \rightarrow \infty$ spontan ab. Sie muss daher beim Erreichen des Immobilisierungspunktes künstlich abgebrochen werden.

3. Die Lucas-Washburn-Gleichung beschreibt die Penetration als Funktion der Zeit. Diese Schreibweise verliert ihre Berechtigung, falls der Strich gleichzeitig zur Penetration auch durch intensive Verdunstung an Feuchte verliert. In solchen Fällen wird die Penetration $\dot{m}_{pen}(X_C)$ durch die momentane Feuchtigkeit des Striches X_C bestimmt.

Aufgrund der oben genannten Kritikpunkte wurde der Bedarf nach einem neuen Ansatz für die Penetration begründet, der im Folgenden erörtert wird.

3.3.3.2 Mathematisches Modell der Penetration

Das in das Rohpapier eindringende Serum verteilt sich in einer dünnen Schicht unmittelbar unterhalb der Streichfarbe. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit mit mikroskopischen Methoden ermittelt (Abschnitt 4.2.2). Die maximale Eindringtiefe des Serums ins Papier beträgt ca. 5 bis 15 μm , was als die Dicke der Penetrationszone L_{pen} definiert wird. Als Illustration betrachte man einen 12 g/m²-Strich (trocken), der bei 60 % Feststoffgehalt aufgetragen wird, mit einem Immobilisierungspunkt bei 80 % Feststoff. Bis zum Erreichen des Immobilisierungspunktes unter diesen Umständen höchstens 4.3 g/m² Wasser über Penetration ans Rohpapier übertragen werden. Bei voll gefülltem Porenraum und einer Papierporosität von ca. 35 bis 50 % erreicht die Flüssigkeit eine Eindringtiefe im oben angegebenen Bereich (8 bis 12 μm).

Bei der Modellbildung wird angenommen, dass sich die penetrierte Flüssigkeit in dieser Zone gleichmäßig verteilt.

In einem neuen Ansatz für die Penetration muss berücksichtigt werden, dass der Strich eine dünne Schicht mit beschränkter Reserve an frei beweglichem Serum ist. Es wird auch in diesem Modell davon ausgegangen, dass die Penetration als ideale Filtration abstrahiert werden kann. Die Flüssigkeit, die in das Rohpapier eindringt, zieht bei ihrer Bewegung die festen Bestandteile der Streichfarbe mit sich. Diese lagern sich dann an der Oberfläche des Papiers an und bilden einen Filterkuchen, dessen Dicke proportional zur bereits penetrierten Flüssigkeitsmenge ist.

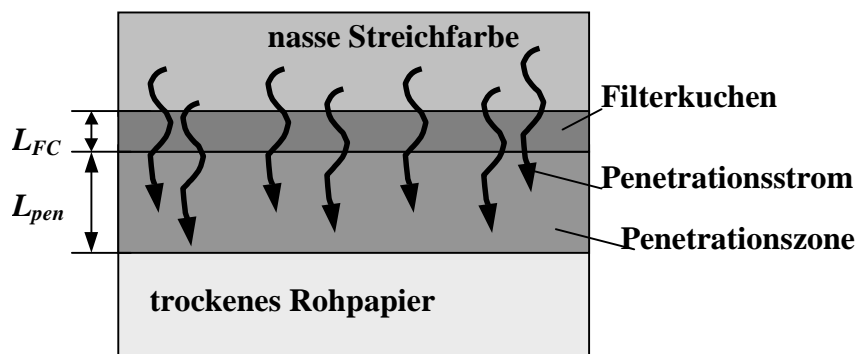


Abbildung 3.10: Penetration als Filtrationsprozess. Die Penetrationszone auf der Oberfläche des Rohpapiers saugt Serum aus dem Strich an. Durch den Flüssigkeitsverlust bildet sich an der Strichgrenze ein Filterkuchen aus.

Der Feuchtegehalt bzw. die Porosität des Filterkuchens bleibt also unabhängig von seiner Dicke konstant, was durch die im Abschnitt 3.4.4 beschriebenen makroskopischen Versuche bestätigt wird. Über dem Filterkuchen befindet sich eine Schicht aus Streichfarbe, deren Feuchtigkeit während der Penetration abnehmen kann. Dies erschwert eine weitere Abgabe von Serum. Dieser Vorgang setzt sich bis zum Immobilisierungspunkt des Striches fort, bei dessen Überschreitung keine Penetration mehr möglich ist.

Als treibende Kraft der freien Penetration wird hier der kapillare Unterdruck angenommen, der im holzhaltigen hydrophilen Rohpapier beim Kontakt mit der Streichfarbe entsteht. Holzfremde Rohpapiere verhalten sich dagegen eher hydrophob, wegen ihres relativ hohen Leimungsgrades. Der Kapillardruck wird hier konstant angenommen, da die maximale Penetrationstiefe gering und die Flüssigkeitsfront kompakt ist [ZMO97].

Der treibenden Kraft setzt sich erstens der Widerstand beim Durchströmen des Filterkuchens und zweitens der Widerstand des Striches gegen eine weitere Abgabe von Serum bei zunehmender Entwässerung entgegen.

Der Strömungswiderstand im Filterkuchen kann durch die Darcy-Gleichung 77 beschrieben werden: Bei konstant bleibenden Materialeigenschaften ist der Widerstand proportional zum Massenstrom \dot{m}_{pen} und zur Dicke des Filterkuchens L_{FC} . Der Strömungswiderstand im Rohpapier wird hierbei aufgrund der geringen Penetrationstiefe L_{pen} und hoher Porosität des Rohpapiers vernachlässigt.

Der zweite Widerstand entsteht durch die Verminderung des Feuchteabgabepotentials im Strich, wenn sein Feuchtegehalt gesenkt wird. Denn je weniger Serum im Strich vorhanden ist, um so schwieriger wird die Entfernung seiner Restfeuchtigkeit. Der Widerstand wird hier in erster Näherung linear zur penetrierten Serummenge m_{pen} angesetzt. Durch diese Tendenz wird sichergestellt, dass die Penetration aus der endlichen Streichfarbenschicht zu einer endlichen Zeit spontan aufhört.

Bei der Modellbildung werden folgende Faktoren vernachlässigt:

- Das dynamische Verhalten der Benetzung der Kapillaren, durch die Adsorption gelöster Stoffe an die Fasern, ist ab-

hängig von der Geschwindigkeit der Penetration [Sal88, Ake96].

- Die Porenstruktur des Rohpapiers ist heterogen und verursacht dadurch eine ungleichmäßige Fortbewegung der Flüssigkeitsfront [MiM56, Dul92, PDS95, PDS96 NDS91].
- Beim Auffeuchten schwillt das Fasernetzwerks des Rohpapiers an [For97, EnL97, EnL98, EnL99, ESK99].
- Die Penetration vollzieht sich zum Teil durch diffusive Mechanismen [Sal88, ABK00, BAK00].

Das Modell für die Penetration setzt beim Verlassen des Coaters an. Durch vorherige Penetration hat sich an dieser Stelle bereits ein Filterkuchen im Strich gebildet. Da die Anfangspenetration ein schneller Vorgang ist, gesteuert durch die hohe Saugkraft des Rohpapiers, bleibt die Dicke des Filterkuchens bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten W_P und Strichgewichten m_{coat} für das selbe Material annähernd konstant. Dies wird durch Versuche bestätigt (Abschnitt 4.2.5). So erhält man aus der Gleichgewichtsbetrachtung der Triebkräfte und Widerstände eine phänomenologische Gleichung für die Penetration:

$$(A + m_{pen})\dot{m}_{pen} + Bm_{pen} = C \quad (81)$$

In Gleichung 81 kommen folgende Terme vor, wobei die linke Seite die Widerstände, die rechte Seite die treibende Kraft repräsentiert:

- Der erste Ausdruck der linken Seite bezieht sich auf die Strömungsverluste im Filterkuchen nach der Darcy-Gleichung 78. Die Konstante A bezeichnet den Widerstand im Rohpapier am Anfang der Penetration, solange der Filterkuchen im Strich erst schwach ausgebildet ist. A ist von der Art der Strichauftragung und von der Materialkombination Papier/Strich abhängig.

- Der zweite Term der linken Seite entsteht durch die erschwerte Flüssigkeitsabgabe bei fortschreitender Entwässerung des Striches. Der „Endlichkeitsfaktor“ des Striches B wird in erster Näherung konstant angenommen. Sein Wert hängt sowohl von der Strichauftragung und der Materialkombination, als auch vom Strichgewicht ab.
- C bezeichnet die über die Zeit gleich bleibende Saugfähigkeit des Papiers. C ist ebenso wie A von der Strichauftragung und von der Materialkombination abhängig.

Das Modell in Gleichung 81 reduziert sich auf die Lucas-Washburn-Form 79, sobald die Bedingungen für deren Gültigkeit erfüllt sind. Dies ist erfüllt, wenn der Strich als unendliches Medium, gleichbedeutend mit $B \rightarrow 0$, angenommen wird und keine Penetration vor dem Anfang der Berechnung erfolgt ($m_{pen}(t=0)=0$).

Eine Analyse des asymptotischen Verhaltens von Gleichung 81 erlaubt einige Vereinfachungen. Für lange Kontaktzeiten zwischen Strich und Rohpapier $t \rightarrow \infty$ werden die mobilen Flüssigkeitsreserven des Striches aufgebraucht, so dass

$$\dot{m}_{pen}(t \rightarrow \infty) = 0 \quad (82)$$

gilt. Die penetrierte Serummenge erreicht den asymptotischen Maximalwert

$$m_{pen}(t \rightarrow \infty) = m_{pen,max} \quad (83).$$

Der Spitzenwert der penetrierten Masse

$$m_{pen,max} = m_{C,dry}(X_{C,0} - X_{immo}) \quad (84)$$

hängt vom Strichgewicht im Trockenzustand $m_{C,dry}$, von der Feuchte der Streichfarbe bei der Auftragung $X_{C,0}$ und von der Feuchte am Immobilisierungspunkt X_{immo} ab. Setzt man diese Ausdrücke in Gleichungen 81 ein, so erhält man

$$m_{pen,max} = \frac{C}{B} \quad (85),$$

wodurch sich das Penetrationsmodell zu

$$(A + m_{pen})\dot{m}_{pen} + B(m_{pen} - m_{pen,max}) = 0 \quad (86)$$

vereinfacht. Diese gewöhnliche Differentialgleichung kann nun mit der gemessenen Penetration nach dem Coater

$$m_{pen}(t=0) = m_{pen,0} \quad (87)$$

als Anfangsbedingung implizit zu

$$t = -\frac{m_{pen}}{B} - \frac{A + m_{pen,max}}{B} \ln[B(m_{pen,max} - m_{pen})] + C_{pen} \quad (88)$$

gelöst werden, wobei

$$C_{pen} = \frac{m_{pen,0}}{B} + \frac{A + m_{pen,max}}{B} \ln[B(m_{pen,max} - m_{pen,0})] \quad (89)$$

die Integrationskonstante ist. Eine explizite Auflösung der Gleichung 88 nach m_{pen} ist jedoch nicht möglich. Die Anpassung der Parameter A und B auf Versuchsdaten gestaltet sich wie folgt: Man unterzieht die Modellgleichung 88 einer dimensionsanalytischen Betrachtung, um sie weiter zu vereinfachen. Zur Transformation der Gleichung werden die Strichdicke L_C und die kinematische Viskosität des Se-

rums v_{ser} verwendet, da beide Größen die Penetration wesentlich beeinflussen. Multipliziert man Gleichung 88 mit dem Faktor $v_{ser}/L_C^2 m_{pen,max}^2$, ergibt sich daraus die dimensionslose Gleichung

$$\left(\frac{A}{m_{pen,max}} + \frac{m_{pen}}{m_{pen,max}} \right) \frac{\dot{m}_{pen}}{m_{pen,max}} \frac{v_{ser}}{L_{coat}} + \frac{B v_{ser}}{m_{pen,max} L_{coat}^2} \left(\frac{m_{pen}}{m_{pen,max}} - 1 \right) = 0 \quad (90).$$

Durch die Einführung der dimensionslosen Kennzahlen

$$\begin{aligned} \tilde{m} &= \frac{m_{pen}}{m_{pen,max}} \\ \tilde{t} &= \frac{t v_{ser}}{L_C^2} \\ \alpha_{pen} &= \frac{A}{m_{pen,max}} \quad \text{und} \\ \beta_{pen} &= \frac{B v_{ser}}{m_{pen,max} L_C^2} \end{aligned}$$

statt den entsprechenden Koeffizienten in Gleichung 90 erhält man die dimensionslose Differentialgleichung

$$(\alpha_{pen} + \tilde{m}) \dot{\tilde{m}} + (\tilde{m} - 1) \beta_{pen} = 0 \quad (91).$$

Diese wird analog zu Gleichung 88 mit der Anfangsbedingung $\tilde{m}(\tilde{t} = 0) = \tilde{m}_0$ gelöst

$$\tilde{t} = -\frac{\tilde{m}}{\beta_{pen}} - \frac{\alpha_{pen} + 1}{\beta_{pen}} \ln[(1 - \tilde{m}) \beta_{pen}] +$$

$$+ \frac{\tilde{m}_0}{\beta_{pen}} + \frac{\alpha_{pen} + 1}{\beta_{pen}} \ln[(1 - \tilde{m}_0)\beta_{pen}] \quad (92)$$

und zu

$$\tilde{t} = \frac{\tilde{m}_0 - \tilde{m}}{\beta_{pen}} - \frac{\alpha_{pen} + 1}{\beta_{pen}} \ln[(1 - \tilde{m})] + \frac{\alpha_{pen} + 1}{\beta_{pen}} \ln[(1 - \tilde{m}_0)] \quad (93)$$

umgeformt. Nun kann man die Beiträge der einzelnen Terme analysieren. Dazu ist es zunächst notwendig, die Größenordnungen der dimensionslosen Konstanten α_{pen} und β_{pen} abzuschätzen. Durch Korrelieren der Penetrations-Messergebnisse (Abschnitt 4.1.5) mit Gleichung 86 ist bekannt, dass die Konstanten A und B die Größenordnungen $O(A) \approx 0.25$ kg bzw. $O(B) \approx 2.5$ kg/s haben. Außerdem können die Werte der verwendeten Hilfsgrößen wie unten aufgeführt zu

$$L_c \approx 10^{-5} \text{ m}, \quad \hat{m}_{pen} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg und } \nu_{ser} \approx 10\nu_w \approx 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

abgeschätzt werden. Die Konstanten α_{pen} und β_{pen} haben also die Größenordnungen

$$O(\alpha_{pen}) = 10^3 \text{ und } O(\beta_{pen}) = 10^8,$$

woraus mit guter Näherung

$$\frac{\alpha_{pen}}{\beta_{pen}} \gg \frac{1}{\beta_{pen}} \quad (94)$$

folgt. So kann man alle Terme, die den Ausdruck $\frac{1}{\beta_{pen}}$ beinhalten,

aus Gleichung 93 eliminieren:

$$\tilde{t} \approx -\frac{\alpha_{pen}}{\beta_{pen}} \ln(1 - \tilde{m}) + \frac{\alpha_{pen}}{\beta_{pen}} \ln(1 - \tilde{m}_0) \quad (95)$$

Aus dieser Gleichung erkennt man, dass diese Funktion nur noch vom Quotienten $\frac{\alpha_{pen}}{\beta_{pen}}$ abhängt und nicht mehr von den einzelnen Parametern α_{pen} und β_{pen} selbst. Das heißt auch, dass die Näherungslösung der Penetrationsgleichung nur von $C_{pen,1} \sim B/A$ abhängig ist. Die ursprüngliche Modellgleichung 86 läßt sich also in Analogie zur Gleichung 95 näherungsweise zu

$$m_{pen} = m_{pen,max} - \exp(C_{pen,1}(t - C_{pen,2})) \quad (96)$$

lösen. Durch die Einbeziehung der Anfangsbedingung aus Gleichung 87 kann die Anzahl der Systemkonstanten weiter auf eine reduziert werden. Man erhält

$$m_{pen} = m_{pen,max} - (m_{pen,max} - m_{pen,0}) \exp(C_{pen,1}t) \quad (97).$$

Die Konstante $C_{pen,1}$ bestimmt man aus der Anpassung der Gleichung 97 an Versuchsdaten. Im Grunde genommen stellt Gleichung 97 die exakte Lösung der Gleichung 81 dar, wenn man diese linearisieren würde. Die genannte Linearisierung müßte dann unter der Annahme erfolgen, dass die Penetration nach der Anfangsphase im Coater nur noch geringfügig fortschreitet:

$$A + m_{pen} \approx A_1 = \text{const.}$$

So würde man aus Gleichung 81 eine vereinfachte Differentialgleichung der Form

$$A_1 \dot{m}_{pen} + B m_{pen} = C$$

erhalten (siehe Gleichung 99). Da aber die für die Linearisierung notwendige Annahme nicht unmittelbar ersichtlich ist, wurde für die Vereinfachung des ursprünglichen Modells (Gleichung 81) der vorher beschriebene Weg gewählt.

Der Vergleich der vereinfachten Korrelation 97 mit der vollständigen Lösung 88 in Abbildung 3.16 zeigt, dass die Messwerte durch beide gut wiedergegeben werden. Die maximale Abweichung zwischen den beiden Kurven beträgt etwa 5 %, was in Anbetracht der Messwert-schwankungen vernachlässigbar ist. Die Penetration kommt für beide Modelle, wie physikalisch zu erwarten ist, für lange Kontaktzeiten zwischen Strich und Papier spontan zum Erliegen. So kann man in der Simulation der Trocknung gestrichener Papiere die Näherungslösung aus Gleichung 97 als Modell für die Penetration verwenden.

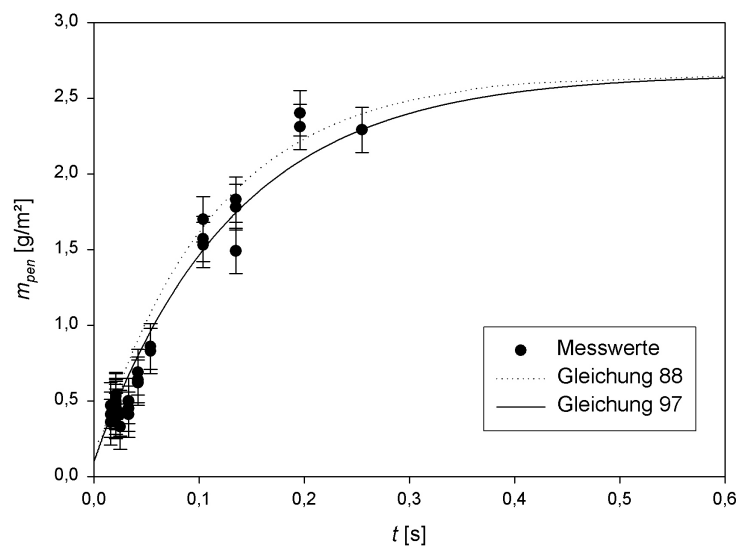


Abbildung 3.16: Vergleich der Messwerte für einen 10 g/m^2 Strich, aufgetragenen mit JetFlow F bei 1000 bis 1300 m/min, mit der direkten Korrelation aus Gleichung 97 und der Näherungslösung nach Gleichung 88. Siehe Abschnitt 4.1.2 für die Bestimmung des Messfehlers.

Der oben genannte Vergleich wurde mit folgenden Parametern vollzogen:

- Parameter des Näherungsmodells (Korrelation 97): $m_{pen,0} = 0.1$ g/m², $C_{pen,1} = -7.6$,
- Parameter der exakten Lösung (Korrelation 88): $m_{pen,0} = 0.1$ g/m², $A = 0.25$ kg, $B = 2.5$ kg/s,
- Strichauftrag: Einzelstrich, 10 g/m² otro,
- Auftragung: JetFlow F und Stiff Blade,
- Bahngeschwindigkeit: 1000 bis 1300 m/min und
- Rohpapier: LWC 47 g/m² otro.

Um die Penetration anwendungsnah zu beschreiben, ist es unzureichend, sie ausschließlich als Funktion der Zeit darzustellen. Diese Schreibweise wäre nur gültig, wenn der Strich unter konstanten Bedingungen und nur durch Penetration entwässert wird. Treten Verdunstung oder Temperaturschwankungen auf, so müssen auch diese berücksichtigt werden. Der Einfluss der Temperatur wird hier durch einen Ansatz wie aus Gleichung 79 Rechnung getragen. Die Verdunstung wird berücksichtigt, indem ihr Beitrag zur Entwässerung derjenigen der Penetration zugezählt wird. Die momentane Geschwindigkeit der Penetration \dot{m}_{pen} wird nunmehr nicht explizit zeitabhängig, sondern als Funktion der aktuellen Strichfeuchte X_C betrachtet. Die Herleitung der Beziehung fängt mit der Ableitung der Gleichung 97 nach der Zeit an. Unter der Einbeziehung des Temperatureinflusses ergibt sich

$$\dot{m}_{pen} = -C_{pen,1} (m_{pen,max} - m_{pen,0}) \frac{\eta_W(T_0)}{\eta_W(T)} \exp(C_{pen,1}t) \quad (98).$$

Durch Elimination der Zeit in diesem Ausdruck mit Hilfe der Gleichung 97 erhält man

$$\dot{m}_{pen} = C_{pen,1} (m_{pen} - m_{pen,max}) \frac{\eta_W(T_0)}{\eta_W(T)} \quad (99).$$

Hier kann statt der Entwässerung durch Penetration m_{pen} ein verallgemeinerter Ausdruck für die verlorene Wassermenge durch Einbeziehung der Strichfeuchte X_C verwendet werden. Auf dieser Grundlage entsteht ein Modell für die Penetration

$$\dot{m}_{pen} = C_{pen,1} [m_{C,dry} (X_{C,0} - X_C) - m_{pen,max}] \frac{\eta_W(T_0)}{\eta_W(T)} \quad (100),$$

das in die Gleichungen 70 und 71 der Massenbilanz implementiert werden kann. Zuletzt stellt sich die Frage nach der Anpassung dieser Gleichung bei Änderungen des Strichgewichtes, da die experimentell bestimmten Konstanten nur für ein bestimmtes Flächengewicht gelten. Aufgrund Gleichung 95 gilt die Schlussfolgerung

$$C_{pen,1} \sim B/A$$

Aus Gleichung 84 wiederum wird klar, dass

$$B \sim m_{C,dry}$$

ist. A bleibt dagegen konstant. Daraus folgt als Beziehung zwischen der berechneten und der aufgrund Messungen bestimmten Systemkonstante

$$\frac{B}{B_{exp}} = \frac{m_{pen,max}}{m_{pen,max,exp}} = \frac{m_{C,dry}}{m_{C,dry,exp}} \quad (101)$$

und für die Anpassungskonstante der Penetration

$$C_{pen,1} = C_{pen,1,exp} \frac{m_{C,dry}}{m_{C,dry,exp}} \quad (102).$$

Die Anwendung der Penetrationsmodelle bei der Korrelation von Messdaten sowie die experimentelle Behandlung werden in Abschnitt 4.1 beschrieben.

3.3.4 Verdunstung von einer feuchten Oberfläche

Die Trocknung von gestrichenem Papier erfolgt durch Verdunstung, die sich bis zum Erreichen des Immobilisierungspunktes der Streichfarbe vorerst von einer vollständig mit Wasser benetzten Oberfläche ereignet. Die sich unmittelbar auf der Oberfläche befindende Luftgrenzschicht ist mit Wasserdampf gesättigt. Die Verdunstung von Wasser kann aufgrund der Stefan-Gleichung [Kne75, KrK93]

$$\dot{m}_{ev} = \frac{DM_V}{RT} P \frac{1}{L_{BL}} \ln \frac{P - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} \quad (103)$$

berechnet werden. Die Intensität der einseitigen Diffusion durch die Grenzschicht der Dicke L_{BL} wird hier durch den Diffusionskoeffizienten D gesteuert. Der Stofftransport entsteht durch die Partialdruckunterschiede von Wasserdampf in der Trocknungsluft $P_{V,air}$ und auf der Papierbahn $P_{V,sur}$. Dabei ist T die Temperatur in der Grenzschicht, P ist der Umgebungsdruck, R die allgemeine Gaskonstante und M_V die molare Masse von Wasserdampf. Führt man in den obigen Ausdruck den Stoffübergangskoeffizienten

$$\beta = \frac{D}{L_{BL}} \quad (104)$$

ein, so ergibt sich daraus

$$\dot{m}_{ev} = \frac{M_V \beta}{RT} P \ln \frac{P - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} \quad (105).$$

Der Stoffübergangskoeffizient β , der für kleine wandnormale Massenströme anwendbar ist, kann durch eine Analogiebeziehung über dem Wärmeübergang berechnet werden. Für technische turbulente Strömungen gilt näherungsweise [KrK92]

$$\frac{\alpha}{\beta} = Le^{0.58} \overline{c_{P,air} \rho_{air}} \quad (106),$$

mit der Lewis-Zahl

$$Le = \frac{a_{air}}{D} \quad (107).$$

Man bedenke zusätzlich, dass der Stoff- und der Wärmeübergang miteinander gekoppelt sind. Diese Wechselwirkung wird jedoch vorläufig nicht berücksichtigt, da alle hier beschriebenen Koeffizienten für geringe Transportraten gelten. Folglich muss die Berechnung von Stofftransport bei hohen Trocknungsraten mit den modifizierten Koeffizienten α^* und β^* für Wärme- und Stofftransport erfolgen (Abschnitt 3.4).

Mit fortschreitender Trocknung wird die Feuchtigkeit sowohl im Strichinneren, als auch auf der Oberfläche reduziert. Die ursprünglich vollständig benetzte Oberfläche trocknet dabei allmählich aus und wird vom Serum nur unvollständig benetzt. Die Trocknungsrate des Striches bleibt aber weiterhin konstant, bis die Oberflächenfeuchte eine untere Grenze erreicht, die weit unter einer vollständig Benetzung liegen kann [Sch88, Sch88a, Bra80, BrH79, KaM87,

RoK90, RoK92, TaK91]. Die Feuchtigkeit bleibt dabei über dem Strichquerschnitt gleichmäßig verteilt [RoK92, BrP99]. Die hier beschriebene Verlängerung des ersten Trocknungsabschnittes wird durch die dreidimensionale Diffusion von Wasserdampf in der Grenzschicht hervorgerufen [Sch88, Sch88a]. So kann die an der Strichoberfläche ungleichmäßig verteilte Dampfkonzentration beim Durchlaufen der Grenzschicht ausgeglichen werden. Dies gelingt unter der Bedingung, dass die Zentren der Verdunstung klein gegenüber der Grenzschichtdicke und gleichmäßig über die Oberfläche verteilt sind. Dabei muss sowohl die Aktivität der Verdunstungszentren, als auch ihre Versorgung durch kapillaren Flüssigkeitstransport zur Oberfläche in ausreichendem Maße gewährleistet sein. Auf diese Weise erreicht man eine Ausdehnung des ersten Trocknungsabschnittes bis herunter zu 10 bis 30 % Oberflächenbenetzung [BrH79]. Die genannten Zahlenwerte gelten für Experimente an Kugelschüttungen. Im Idealfall können sogar viel kleinere Werte zur Geltung kommen [Sch88, Sch88a]. Außerdem konnte aufgrund von Berechnungen gezeigt werden, dass bei der Austrocknung von porösen Oberflächen ein Feuchtigkeitsmuster entstehen kann [BrP99]. Dieser besteht nicht notwendigerweise aus mikroskopischen Strukturen. Dies wurde experimentell durch NMR-Tomographie nachgewiesen. Trotz makroskopischer Strukturierung kann auch hier bei unvollständiger Benetzung eine konstante Trocknungsrate aufrecht erhalten werden.

Der oben genannte Ansatz der Erweiterung des ersten Trocknungsabschnittes kann auch auf Schüttungen aus Mikropartikeln angewandt werden [RoK90, RoK92]. So kann man ihn auch beim Strich einsetzen. Der Ansatz liefert aber lediglich qualitative Anhaltspunkte für eine Grenzfeuchte X_{cr} des zweiten Trocknungsabschnittes, bei deren Unterschreitung die Trocknungsrate einen sinkenden Regime annimmt. An dieser Stelle wird angenommen, dass diese Grenzfeuchte

$$X_{cr} = X_{immo} \quad (108)$$

am Immobilisierungspunkt der Streichfarbe erreicht wird. Diese Annahme fand ihre Bestätigung durch die Validierung der Simulation aufgrund mehrerer Streichversuche (Kapitel 5).

3.3.5 Verschließen der Strichoberfläche

Die oben angestellten Betrachtungen gelten nur im Idealfall einer mit Wasser gleichmäßig benetzten Oberfläche. Beim Strich muss man jedoch zwei zusätzliche Einflüsse berücksichtigen, die auf die Verdunstung eine Bremswirkung ausüben können. Erstens weist der auf das raue und inhomogen kompressible Rohpapier aufgetragene Strich eine ungleichmäßige Massenverteilung auf. Dünne Stellen trocknen dabei schneller aus als dicke. So kann es passieren, dass beträchtliche Anteile der Oberfläche mit der Zeit anfangen, sich bezüglich der Trocknung passiv zu verhalten. Zweitens enthält das Serum Polymere und feindisperse Partikeln, die sich während der Trocknung an der Oberfläche anreichern und die Oberflächenporen versperren können. So verringert sich der für Verdunstung zu Verfügung stehende Raum und die Zugänglichkeit der Oberflächenporen für die Versorgung der Verdunstungszentren mit Flüssigkeit [Gar82, MTD95, XBC00].

Um das Verschließen der Oberfläche zu beschreiben, führt man eine Minderung des Stoffübertragungskoeffizienten β ein. Bei der Berechnung des neuen Koeffizienten

$$\tilde{\beta} = C_{\beta} \beta \quad (109)$$

handelt es sich um einen linearen Ansatz mit der Hemmkonstante C_β . Befindet sich die Streichfarbe noch im mobilen Zustand, d. h. $X_C > X_{immo}$, geschieht der Flüssigkeitstransport zur Oberfläche ungehindert. Mit dem Serum werden gleichzeitig auch seine feindispersen Bestandteile zur Oberfläche befördert. Werden dort Poren verstopft, führt dies zur Entstehung eines zusätzlichen Transportwiderstandes. Die Menge der in der Oberflächenschicht abgelagerten Feinpartikeln ist proportional zur Menge des verdunsteten Serums, so dass der Ansatz für die Hemmkonstante

$$C_\beta = 1 - \left(1 - C_{\beta,\min}\right) \frac{X_{C,0} - X_C}{X_{C,0} - X_{immo}} \quad \text{für } X_C > X_{immo} \quad (110)$$

linear mit der Strichfeuchtigkeit X_C abnehmen muss. Diese Tendenz wird bis zum Immobilisierungspunkt fortgeführt. Beim Erreichen der Immobilisierung löst sich die Trocknungsfront von der Strichoberfläche und zieht sich in das Strichinnere zurück. Die Flüssigkeitszufuhr zur Oberfläche hört dabei auf und hinterläßt die dortige Aggregation im Status Quo. Bei einer weiteren Abnahme der Feuchte erfährt die Oberfläche keine weitere Hemmung mehr:

$$C_\beta = C_{\beta,\min} \quad \text{für } X_C < X_{immo} \quad (111).$$

Die Modellkonstante $C_{\beta,\min}$ wurde aus Streichversuchen zu $C_{\beta,\min} = 0.2$ bestimmt. Diese Reduktion der Verdunstung von 100 auf 20 % während der Immobilisierung erschien universell für alle bisher getesteten Streichfarben (siehe Abschnitt 4.4).

3.3.6 Verdunstung durch poröse Medien

Nachdem die Strichfeuchtigkeit den kritischen Wert $X_C = X_{immo}$ erreicht, zieht sich die Trocknungsfront in das Innere des porösen Mediums zurück. Der Verdunstungsstrom

$$\dot{m}_{ev} = \frac{M_V \beta_{por}}{RT} P \ln \frac{P - P_{V,sur}}{P - P_{V,front}} \quad (112)$$

muss dann erst durch eine poröse Schicht der Dicke L_{por} hindurchdiffundieren, bevor er die luftseitige laminare Grenzschicht

$$\dot{m}_{ev} = \frac{M_V \beta}{RT} P \ln \frac{P - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} \quad (113)$$

erreicht. Die beiden Widerstände, die der Dampfstrom beim Transport überwindet, kann man durch die Einführung eines effektiven Stoffübergangskoeffizienten β_{eff} berücksichtigen. In Anlehnung an Gleichung 105 erhält man den Massenstrom zu

$$\dot{m}_{ev} = \frac{\beta_{eff}}{R_V T} P \ln \frac{P - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} \quad (114).$$

Eliminiert man den Term $P - P_{V,sur}$ aus Gleichung 112, ausgehend von Gleichung 113, so erhält man

$$\dot{m}_{ev} \left(1 + \frac{\beta_{por}}{\beta} \right) = \beta_{por} \ln \frac{P - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} \quad (115).$$

Setzt man dies in Gleichung 114 ein, ergibt sich daraus ein Ansatz für Reihenschaltung der beiden Diffusionswiderstände [Kri62]

$$\frac{1}{\beta_{eff}} = \frac{1}{\beta_{por}} + \frac{1}{\beta} \quad (116).$$

Durch die Einbeziehung der Definitionen der beiden Teilwiderstände aus Gleichungen 104 und 109 folgt schließlich

$$\frac{1}{\beta_{eff}} = \frac{L_{por}}{D_{eff}} + \frac{1}{\tilde{\beta}} \quad (117).$$

Die effektive Diffusivität D_{eff} eines porösen Mediums wird nach

$$D_{eff} = D\varepsilon_{free}^3 \quad (118)$$

modelliert [PrW79, Har89, HaS90]. Sie ist stark vom frei zugänglichen Hohlraumanteil ε_{free} des Mediums

$$\varepsilon_{free} = \frac{V_{por,air}}{V} \text{ bzw. } \varepsilon_{free} = \varepsilon \frac{V_{por,air}}{V_{por}} \quad (119)$$

abhängig, die für die Diffusion zu Verfügung steht. Dabei ist V der Volumen des porösen Körpers, V_{por} der Gesamtvolumen der Hohlräume und $V_{por,air}$ der Volumen der luftgefüllten Porenräume. Die Porosität wird hier als

$$\varepsilon = \frac{V_{por}}{V} \quad (120)$$

definiert. Die dritte Potenz der Porosität in Gleichung 118 ist durch die multiplikative Verknüpfung dreier Widerstandsfaktoren der Diffusion in einem porösen Medium begründet:

- Der frei stehende Flächenanteil im porösen Medium, der für die Diffusion zu Verfügung steht ist proportional zur Porosität: $A_{free} = A \varepsilon_{free}$.
- Die Verlängerung des Diffusionsweges durch krummlinig verlaufende Poren – die Tortuosität – ist proportional zur Porosität: $\psi \sim \varepsilon_{free}$.
- Der Anteil an Sackporen, durch die keine Diffusion erfolgen kann, wodurch die transportfähige Oberfläche A_{free} weiter reduziert wird, ist proportional zur Porosität: $A_{free}^* = A_{free} \varepsilon_{free}$.

Betrachtet man nun die Verdunstung über die freie Strichoberfläche, so trennt die Trocknungsfront im Strich folgende zwei Gebiete voneinander: Zur freien Strichoberfläche zugewandt befindet sich eine durch die luftseitige Verdunstung vollständig ausgetrocknete Schicht mit der Porosität $\varepsilon = \varepsilon_{free}$. Unterhalb der Trocknungsfront befindet sich dagegen ein Gebiet, dessen Feuchte über die Zeit konstant bleibt. Die Dicke der trockenen Schicht $L_{C,dry}$ nimmt durch die fortwährende Trocknung immer weiter zu. Dies führt gleichzeitig zur Reduktion des feuchten Bereichs

$$L_{C,moist} = L_C - L_{C,dry} \quad (121).$$

Aus dieser Modellvorstellung heraus können Ansätze für den Transportweg in der porösen Schicht L_{por} aus Gleichung 117 entwickelt werden:

- Für die Verdunstung aus dem Strich, über die luftseitige Strichoberfläche gilt dann der Ausdruck

$$L_{por} = L_C \left(1 - \frac{X_C}{X_{immo}} \right) \quad (122).$$

Am Immobilisierungspunkt, wenn alle Porenräume im Strich noch mit Serum gefüllt sind, befindet sich die Trocknungsfront noch unmittelbar auf der Oberfläche

$$L_{por}(X_{immo}) = 0.$$

Bei vollständiger Austrocknung des Striches erreicht sie die Rohpapier-Grenzschicht mit

$$L_{por}(X_C = 0) = L_C.$$

- Die Diffusion von der Unterseite des Striches und von der Penetrationszone des Rohpapiers aus in die papierseitige Umgebungsluft erfolgt über die gesamte Dicke des Rohpapiers

$$L_{por} = L_P \quad (123).$$

- Die Verdunstung aus der trockenen Schicht des Rohpapiers in die papierseitige Umgebungsluft erfolgt aus der Mitte

$$L_{por} = \frac{L_P}{2} \quad (124)$$

dieser Zone.

- Der Dampftransport aus der Penetrationszone des Rohpapiers in die strichseitige Umgebungsluft erfolgt über den Strich hindurch

$$L_{por} = L_C \quad (125).$$

Dieser Transportweg ist nur möglich, wenn der Strich offene Porenräume hat und für den Wasserdampf durchlässig wird. Dies ist erst der Fall, wenn seine Feuchte unter dem Immobilisierungspunkt liegt, der einen Sättigungspunkt darstellt:

$$\varepsilon_{free} = \varepsilon \left(1 - \frac{X_C}{X_{immo}} \right) \quad (126).$$

Die Porosität des Rohpapiers beträgt dabei stets $\varepsilon_{free} = \varepsilon_P$.

3.4 Wechselwirkung von Wärme- und Stofftransport bei hohen Massenströmen

Beim Aufstellen der Gleichungen für die konvektive Wärmeübertragung im Abschnitt 3.2.3 wurde das Auftreten von Stofftransport außer acht gelassen. Ebenso wurde im Abschnitt 3.3 der Einfluss hoher Massenströme auf die Gesetzmäßigkeiten des Stofftransport vernachlässigt. Vorläufig wurde im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass sich diese Vorgänge gegenseitig nicht beeinflussen. Bei konvektiver Trocknung sind jedoch Stoff- und Wärmetransport miteinander gekoppelt, insbesondere bei höheren Massenströmen. Der Grund dafür ist in der Ausdehnung der Grenzschicht durch den wandnormalen Massenstrom zu finden. Dadurch werden für die Modellierung der Transportvorgänge modifizierte Transportkoeffizienten α^* und β^* benötigt. Für deren Berechnung wird eine Näherungslösung verwendet [Kas80, BSL60].

Die unten dargestellte Lösung bezieht sich zwar streng genommen nur auf laminare Strömungen bzw. auf eine laminare Unterschicht, kann aber näherungsweise auch auf turbulente Grenzschichten angewendet werden.

Als Erstes werden hier die grundlegenden Gleichungen der diffusiven Stoffübertragung durch eine laminare Grenzschicht hindurch diskutiert. Bei einem verschwindend kleinen wandnormalen Massenstrom $\dot{m}_{ev} \rightarrow 0$ erhält man diesen aus Gleichung 105 zu

$$\dot{m}_{ev} = \beta \frac{PM_V}{RT} \ln \frac{P - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} = \beta c \ln(1 + B) \quad (127),$$

mit den Hilfsgrößen

$$c = \frac{PM_V}{RT} \quad \text{und} \quad B = \frac{P_{V,sur} - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}}.$$

Bei einem höheren Massenstrom $\dot{m}_{ev} > 0$ lautet die Transportgleichung

$$\dot{m}_V = \beta^* \frac{PM_V}{RT} \frac{P_{V,sur} - P_{V,air}}{P - P_{V,sur}} = \beta^* cB \quad (128).$$

Aus Gleichungen 127 und 128 erhält man eine erste Beziehung zwischen den beiden Koeffizienten für den Stofftransport β und β^*

$$\frac{\beta^*}{\beta} = \frac{\ln[1 + B]}{B} \quad (129)$$

mit einem Gültigkeitsbereich für niedrige Verdunstungsraten.

Ist ein größerer Massenstrom $\dot{m}_{ev} \gg 0$ vorhanden, so wird durch ihn die Grenzschicht verzerrt, was eine Beeinflussung des Strömungs-, des Temperatur- und des Konzentrationsfeldes bedeutet. Für die Beschreibung von gleichzeitigem Stoff-, Wärme- und Impulstransport müssen die Grenzschichtgleichungen analysiert werden. Die dazu notwendige Strömungsgeometrie kann vereinfacht als eine mit der Bulkgeschwindigkeit V_∞ parallel angeströmte ebene Platte betrachtet werden, von der normal zur Anströmung ein Verdunstungsstrom ausgeht.

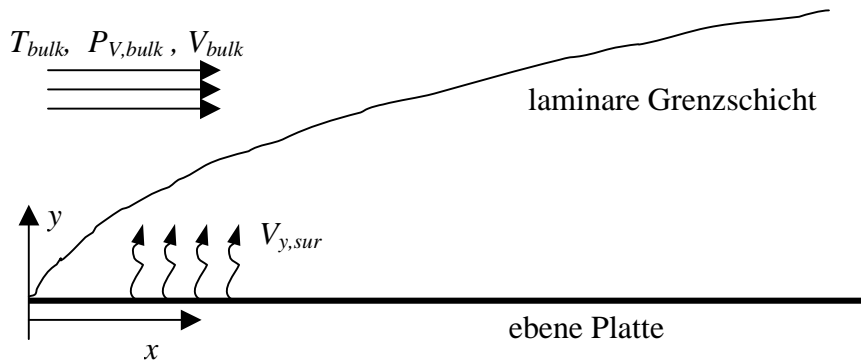


Abbildung 3.17: Parallel angeströmte ebene Platte mit wandnormalem Verdunstungsstrom

Nimmt man zusätzlich noch an, dass alle Stoffwerte im System konstant bleiben, so ergeben sich folgende Gleichungen für die Grenzschicht [BSL60]:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (130),$$

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \quad (131),$$

$$V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_P} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (132),$$

$$V_x \frac{\partial P_V}{\partial x} + V_y \frac{\partial P_V}{\partial y} = D \frac{\partial^2 P_V}{\partial y^2} \quad (133).$$

Die Randbedingungen lauten:

für $y \rightarrow \infty$:

$$V_x = V_{bulk}$$

$$T = T_{bulk}$$

$$P_V = P_{V,bulk}$$

für $y = 0$:

$$V_x = 0$$

$$T = T_{sur}$$

$$P_V = P_{V,sur}$$

Man führt an dieser Stelle die dimensionslosen Profilvariablen

$$\begin{aligned} \Phi_V &= \frac{V_x}{V_{bulk}} \\ \Phi_T &= \frac{T - T_{sur}}{T_{bulk} - T_{sur}} \\ \Phi_W &= \frac{P_V - P_{V,sur}}{P_{V,bulk} - P_{V,sur}} \end{aligned} \quad (134)$$

für die Geschwindigkeit V , die Temperatur T und die Diffusion aufgrund der Partialdruckunterschiede von Wasserdampf ΔP_V und die entsprechenden Kennzahlen

$$\begin{aligned} \Lambda_V &= \frac{\nu}{\nu} \\ \Lambda_T &= \frac{\nu}{\frac{\lambda}{\rho c_P}} = \text{Pr} \\ \Lambda_W &= \frac{\nu}{D} = \text{Sc} \end{aligned} \quad (135)$$

ein. Die beiden Ortskoordinaten x und y können durch die Einbeziehung der Grenzschichtdicke

$$\delta(x) = \sqrt{\frac{\nu x}{V_{bulk}}} \quad (136)$$

auf ein dimensionsloses Längenmaß

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{y}{x} \sqrt{\text{Re}_x} \quad (137)$$

mit

$$\text{Re}_x = \frac{V_{bulk} x}{\nu} \quad (138)$$

reduziert werden. Der wandnormale Diffusionsstrom, der die ausgebildete laminare Grenzschicht durchströmt, beträgt

$$\dot{m}_{ev} = \frac{DM_V}{RT} \frac{dP_V}{dy} \quad (139)$$

und läßt sich mit

$$V_{y,sur} = \frac{\dot{m}_{ev}}{\rho_V} \quad (140)$$

in eine dimensionslose Form umwandeln. So erhält man dann

$$K = \frac{2V_{y,sur}}{V_{bulk}} \sqrt{\frac{V_{bulk} x}{\nu}} \quad (141)$$

beziehungsweise

$$K = \frac{1}{Sc} \cdot \frac{P_{V,sur} - P_{V,bulk}}{1 - P_{V,sur}} \cdot \Phi'_{W,sur} \quad (142)$$

mit

$$\Phi'_{W,sur} = \frac{d\Phi}{d\xi} \Big|_{\xi=0} \quad (143).$$

Transformiert man nun das System der Erhaltungsgleichungen 130 bis 133 durch die neuen Variablen aus den Gleichungen 134, 135 und 137, so erhält man eine universelle Transportgleichung für Temperatur, Impuls und Konzentration

$$-Af\Phi' = \Phi'' \quad (144)$$

mit

$$f = -K + \int_0^{\xi} 2\Phi_V d\xi \quad (145)$$

und den Randbedingungen

$$\begin{aligned} \xi = 0: \quad \Phi &= 0 \\ \xi \rightarrow \infty: \quad \Phi &= 1 \end{aligned} \quad (146).$$

Löst man Gleichung 144, so erhält man den Verlauf der Temperatur, der wandnormalen Geschwindigkeit und der Partialdrücke von Wasserdampf in der Grenzschicht. Es ist anzumerken, dass die Dicke aller drei Grenzschichten zunehmen wird, sobald sich ein Stofftransport von der Platte Richtung Bulk einstellt (Abbildungen 3.17 und 3.18). Die Grenzschichtdicke ist dabei ein wichtiger Faktor für die Modellierung des Stofftransports.

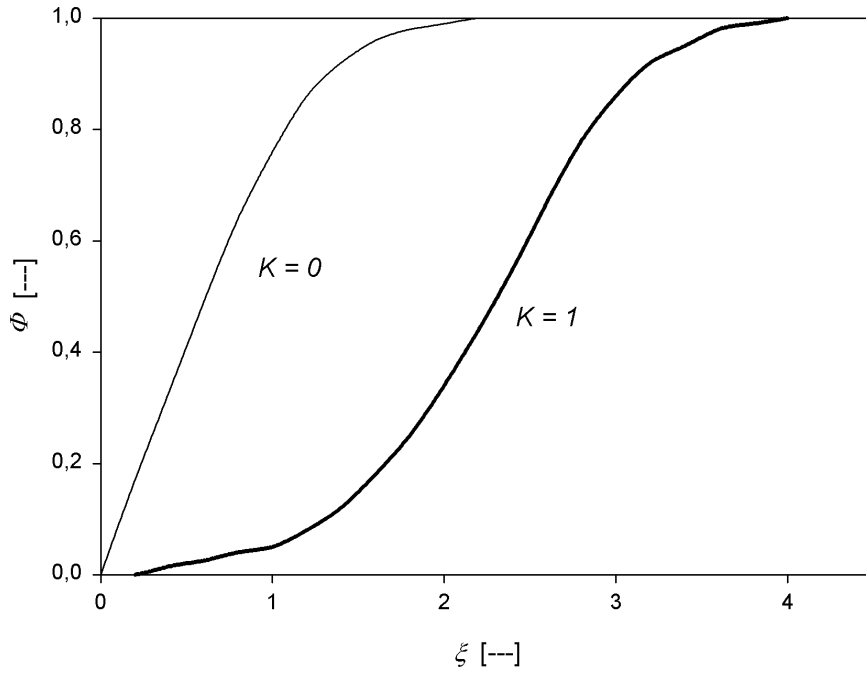


Abbildung 3.18: Veränderung der Grenzschichtdicke beim Auftreten eines wandnormalen Verdunstungsstroms ($K=1$), gegenüber dem Fall ohne Verdunstung ($K=0$). Fixiert man die Koordinate x , so wird ξ proportional zur wandnormalen Koordinate y .

Um den Einfluss veränderter Grenzschichtdicken auf den Stofftransport zu untersuchen, wird hier der dimensionslose Massenstrom K unter die Lupe genommen. So folgt nach Einsetzen der Definition vom Faktor B aus Gleichung 127 in Gleichung 142

$$K = \frac{1}{Sc} B \Phi'_{W,sur} \quad (147).$$

Zusätzlich gilt aufgrund von Gleichung 128 für die Geschwindigkeit von Wasserdampf auf der Oberfläche

$$V_{V,sur} = \frac{\dot{m}_{ev}}{\rho_{V,sur}} = \beta^* B \quad (148)$$

bzw. aufgrund Gleichung 127

$$V_{V,sur} = \frac{\dot{m}_{ev}}{\rho_{V,sur}} = \beta \ln[1+B] \quad (149).$$

Durch Gleichsetzen der beiden Definitionen des Massenstromes K aus Gleichungen 141 und 147, sowie durch Einsetzen der Geschwindigkeiten vom wandnormalen Dampfstrom $V_{V,sur}$ aus Gleichung 149 ergibt sich

$$\frac{1}{Sc} B \Phi'_{W,sur} = \frac{2}{V_{bulk}} \beta^* B \sqrt{Re_x} \quad (150).$$

Eine Umstellung dieser Gleichung nach dem dimensionslosen Gradienten der Konzentration an der Plattenoberfläche resultiert in

$$\begin{aligned} \Phi'_{W,sur}(B) &= Sc \beta^* \frac{2}{V_{bulk}} \sqrt{Re_x} = \frac{\beta^* x}{D} \frac{2\nu}{x V_{bulk}} \sqrt{\frac{V_{bulk} x}{\nu}} \\ &= Sh_x^* \frac{2}{\sqrt{Re_x}} \end{aligned} \quad (151).$$

Die Sherwood-Zahl Sh ist dabei folgendermaßen definiert:

$$Sh_x = \frac{x\beta}{D} \quad \text{und} \quad Sh_x^* = \frac{x\beta^*}{D} \quad (152)$$

Gleichung 151 entsprechend folgt für den Fall geringer Massenströme unter Verwendung von Gleichungen 127, 141, 147 und 149

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow 0} \Phi'_{W,sur} &= Sc \beta \ln[1+B] \frac{2}{V_{bulk}} \sqrt{Re_x} = \\ &= Sh_x \frac{2}{\sqrt{Re_x}} \frac{\ln[1+B]}{B} \stackrel{L'Hospital}{=} Sh_x \frac{2}{\sqrt{Re_x}} \end{aligned} \quad (153).$$

Aus der Analogie von Impuls- und Wärmeübertragung [Kas72, Sch98], die aufgrund der Transportgleichung 144 für alle drei Transportarten folgt, gilt

$$\Phi'_{T,sur}(B) = \frac{2Nu_x^*}{\sqrt{Re_x}} \quad (154)$$

und

$$\lim_{B \rightarrow 0} \Phi'_{T,sur} = \frac{2Nu_x}{\sqrt{Re_x}} \quad (155).$$

Aus den Gleichungen 141 bis 153 läßt sich die Modifikation des Stofftransportkoeffizienten bei erhöhten Massenströmen für $Sc = const.$ zu

$$\frac{\beta^*}{\beta} = \frac{Sh^*}{Sh} = \frac{\Phi'_{W,sur}(B)}{\lim_{B \rightarrow 0} \Phi'_{W,sur}} = \frac{\Phi'_{w,sur}(B)}{const.} \quad (156)$$

ermitteln. Der Term $\Phi'_{W,sur}(B)$ in Gleichung 156 kann aufgrund der Transportgleichung 144 numerisch berechnet werden [Kas80].

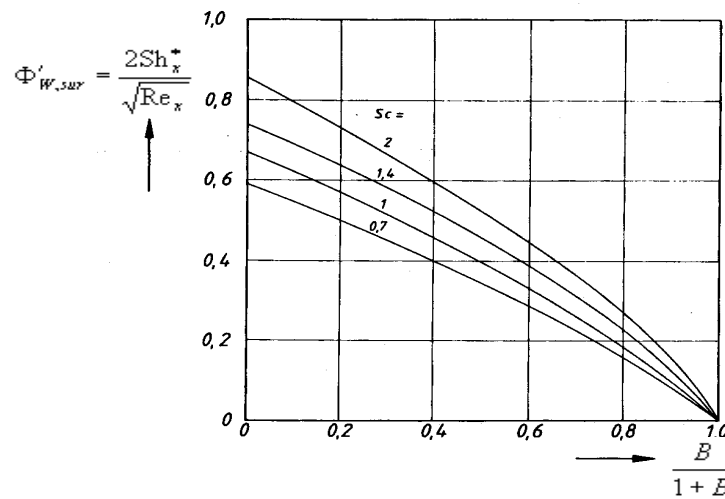


Abbildung 3.19: Konzentrationsfelde Φ_W an einer parallel angeströmten Wand als Funktion des Parameters B und der Sc -Zahl [Kas80].

So kann aus Gleichung 156 und dem Verlauf der Kurven in Abbildung 3.19 eine Korrelation für den Stofftransportkoeffizienten β^* , mit dem Parameter B aus Gleichung 127

$$\frac{\beta^*}{\beta} = \frac{\ln(1+B)^{1,4}}{(1+B)^{1,4} - 1} \quad (157)$$

gefunden werden. Eine grafische Darstellung dieses Sachverhaltes gibt Abbildung 3.20:

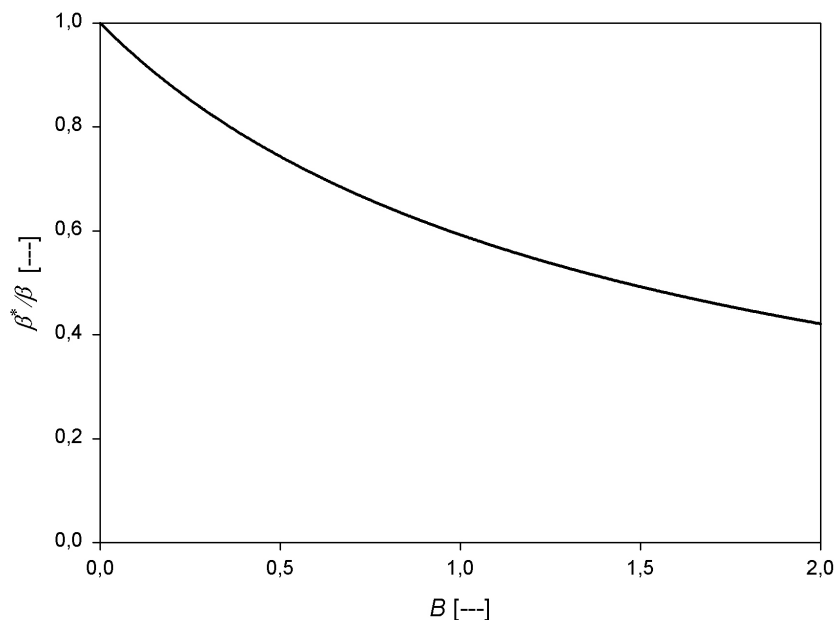


Abbildung 3.20: Der effektive Stoffübergangskoeffizient β^* sinkt gegenüber dem Bezugswert β bei der Erhöhung des wandnormalen Massenstromes [Kas80]

Da aufgrund Gleichung 3.120 alle Profilvariablen Φ_i selbstähnliche Verläufe über die Grenzschichtdicke aufweisen, gilt die analoge Schlussfolgerung auch für die Wärmeübertragung. So erhält man

$$\frac{\alpha^*}{\alpha} = \frac{\ln(1+B)^{1,4}}{(1+B)^{1,4} - 1} \quad (158).$$

Wie in Abbildung 3.15 zu sehen ist, erfahren die Transportkoeffizienten α^* und β^* bei hohen Massenströmen gegenüber den Bezugswerten α und β eine Hemmung. Diese Erhöhung des Transportwiderstandes mit steigendem B -Faktor hat folgende Erklärung:

Steigt der Partialdruck von Wasserdampf P_{v0} an der Oberfläche der ebenen Platte in Abbildung 3.17, wird dadurch der B -Faktor unmittelbar erhöht (Gleichung 127). Eine Erhöhung des B -Faktors bedeutet einen verstärkten Massenstrom der Verdunstung \dot{m}_{ev} (Gleichungen 127 und 128). Bei einem verstärkten Massenstrom \dot{m}_{ev} nimmt die Grenzschichtdicke für Wärme-, Impuls- und Stofftransport zu (Abbildung 3.18). Eine höhere Grenzschichtdicke bedeutet wiederum einen größeren Transportwiderstand, da die Wege für Diffusion und Konvektion dadurch länger werden. Steigende Transportwiderstände verursachen letztlich eine Reduktion der Transportkoeffizienten α^* und β^* (Abbildung 3.20).

3.5 Stoffeigenschaften

3.5.1 Stoffwerte der Luft

Die Trocknung von gestrichenem Papier ereignet sich in Luft bei atmosphärischem Druck. Der Temperaturbereich der Trocknungsluft erstreckt sich im Bereich zwischen 20 und 400 °C, so dass die Luftphase stets als ideales Gas betrachtet werden kann. Außerdem herrscht im Allgemeinen nur eine geringe Sättigung mit Wasserdampf. So kann die Luft im Modellsystem als trockene Gasphase behandelt werden.

Viskosität

Die dynamische Viskosität η verdünnter Gase kann mit Hilfe der kinetischen Gastheorie berechnet werden [BSL60, ChC70]. Eine Korrelation

$$\eta_{air}(T) = C_0 \frac{\sqrt{T}}{1 + \frac{C_1}{T}} \quad (159)$$

mit $C_0 = 1.53 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{ms\sqrt{K}}$ und $C_1 = 128.324K$ findet man in Koch [Koc50]. Die Lufttemperatur T wird in Kelvin eingetragen. Der Fehler, den man gegenüber Tabellenwerte [VDI83] macht, beträgt auf dem Bereich 20-300 °C bis etwa 2 %.

Dichte

Die Dichte wird in Abhängigkeit von Druck und Temperatur aufgrund des Gesetzes idealer Gase berechnet:

$$\rho_{air} = \frac{PM_{air}}{RT} \quad (160)$$

Der Fehler dieser Korrelation gegenüber Tabellenwerten [VDI83] beträgt auf dem Bereich 20-300 °C bis etwa 1.4 %.

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität der Luft ist im Temperaturbereich von 20 bis 400 °C annähernd konstant mit dem Mittelwert $c_{P,air} \approx 1020 \text{ J/kgK}$ [VDI83].

Wärmeleitfähigkeit

Aufgrund der kinetischen Gastheorie kann die Wärmeleitfähigkeit eines verdünnten Gases mit seiner Viskosität korreliert werden [BSL60]:

$$\lambda_{air}(T) = \left(c_{P,air} + \frac{5}{4} \frac{R}{M_{air}} \right) \eta_{air} \quad (161)$$

Da die spezifische Wärmekapazität annähernd konstant ist, kann statt Gleichung 161 der Ansatz

$$\lambda_{air}(T) = C_2 \eta_{air} T^n \quad (162)$$

mit $C_2 = 923.468 \cdot 10^{-6}$ und $n = 0.07436$ verwendet werden [Koc50]. Die Temperatur wird in Kelvin eingetragen. Der Fehler der berechneten Werte gegenüber Tabellenwerte [VDI83] beträgt auf dem Bereich 20-300 °C bis etwa 2 %.

Molare Masse der trockenen Luft

Die molare Masse der trockenen Luft beträgt $M_{air} = 28.96 \text{ kg/kmol}$ [VDI83].

3.5.2 Wasser und Wasserdampf

Dampfdruck

Die Dampfdruckkurve kann durch die Wagner-Gleichung

$$\ln \frac{P_V}{P_{cr}} = \frac{1}{T_r} \left(A(1 - T_r) + B(1 - T_r)^{1.5} + C(1 - T_r)^3 + D(1 - T_r)^6 \right) \quad (163)$$

mit $A = -7.76451$, $B = 1.45838$, $C = -2.77580$ und $D = -1.23303$ [RPP86] beschrieben werden. Die reduzierte Temperatur $T_r = T/T_{cr}$ wird mit T in Kelvin berechnet. Der Fehler der Korrelation 163 gegenüber Tabellenwerte [WSB00] beträgt im Bereich 20-90 °C etwa 0.2 %.

Verdampfungsenthalpie

Die im gestrichenen Papier vorhandene Flüssigkeit wird bezüglich der Verdunstung als reines Wasser behandelt. Die Verdampfungsenthalpie ΔH_V von Wasser kann stellvertretend für den Serum mit der Watson-Korrelation (siehe Reid, Prausnitz und Poling)

$$\Delta H_V(T) = A(T_{cr} - T)^B \quad (164)$$

mit $A = 356.545$, $B = 0.3287$ und $T_{cr} = 647 \text{ K}$ berechnet werden [RPP86]. Die Temperatur T wird in Kelvin eingesetzt. Bezogen auf die Tabellenwerte aus dem VDI-Wärmeatlas [VDI83] verursacht die Korrelation 164 im Bereich 20-90 °C einen Fehler von maximal 0.06 %.

Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft

Für den Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf D_V in Luft gilt im Bereich von 20 bis 90 °C [Sch38]:

$$D = \frac{D(T_0)}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.81} \quad (165)$$

mit $P \approx P_0 = 1 \text{ bar}$ und $D(T_0) = 22.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ bei $T = T_0 = 273.15 \text{ K}$. Die oben angegebene Korrelation behält auch bei erhöhten Temperaturen von einigen Hundert °C ihre Gültigkeit [KDW98]. So gilt Gleichung 3.141 im gesamten Temperaturbereich für die Trocknung von gestrichenem Papier. Vergleicht man Gleichung 165 mit Messdaten [Sch69], so kann man eine Abweichung von bis zu 5 % im Bereich 20-90 °C feststellen.

Spezifische Wärmekapazität von Wasser und Wasserdampf

Die spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf ändert sich nicht wesentlich mit der Temperatur. Sie kann daher als eine Konstante festgelegt werden: $c_{p,V} \approx 2050 \text{ J/kgK}$ [VDI83].

Die spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser beträgt $c_{P,W} = 4.18 \text{ kJ/kgK}$ [VDI83].

Molare Masse von Wasser

Die molare Masse von Wasser beträgt $M_W = 18.0153 \text{ kg/kmol}$ [VDI83].

3.5.3 Rohpapier

Sorptionsisotherme: Partialdruck und Sorptionsenthalpie

Wird Wasser im Trocknungsgut durch Ad- oder Absorption gebunden, vergrößert sich auf diesem Wege die Stabilität seiner Moleküle. Daher muss beim Phasenwechsel des Wassers zusätzlich zur Verdampfungsenthalpie ΔH_V nach Gleichung 164 Energie in Form von Bindungs- oder Sorptionswärme ΔH_{sorp} umgesetzt werden. Die bei der Verdunstung aufzuwendende Enthalpie

$$\Delta H = \Delta H_V + \Delta H_{sorp} \quad (166)$$

besteht also aus den beiden Komponenten. Durch den benötigten zusätzlichen Energieaufwand wird im Falle einer hygroskopischen Substanz gegenüber freiem Wasser zu einer Reduktion des Partialdruckes in der Umgebungsluft kommen. Die Verschiebung des Gleichgewichtes wird durch Sorptionsisothermen beschrieben, die den Wassergehalt im Gut und die relative Feuchte in der Luft in Beziehung setzen. Da im vorliegenden Modell des gestrichenen Papiers das Rohpapier als einzige hygroskopische Komponente angesehen wird, muss sein Sorptionsverhalten in die Simulation der Trocknung integriert werden. Dazu wird eine empirische Korrelation für die relative Luftfeuchte φ verwendet (siehe Hei92] und Abbildung 3.21)

$$\varphi = 1 - \exp \left[C_1 X_{P,red}^{C_2} + C_3 T_P X_{P,red}^{C_4} \right] \quad (167).$$

Das hygroskopische Verhalten von Holzschliff wird mit den Parametern [Pra68]

$$C_1 = 47.58$$

$$C_2 = 1.877$$

$$C_3 = 0.10085 \quad [1/K]$$

$$C_4 = 1.0585$$

beschrieben. Diese Konstanten gelten zwar ihrem Ursprung nach nur für holzhaltige Papiere, wurden aber ebenso bei holzfreien Sorten erfolgreich in der Simulation eingesetzt. Die oben angegebenen Konstanten werden im hier beschriebenen Modellsystem universell für alle Sorten von Rohpapier verwendet. In der Literatur [KaS82, PaK96, LaT84, HaS90, Sch92, Bos96, RaC97, CRT97] findet man außerdem die Sorptionsisothermen für einige ausgewählte Papiersorten.

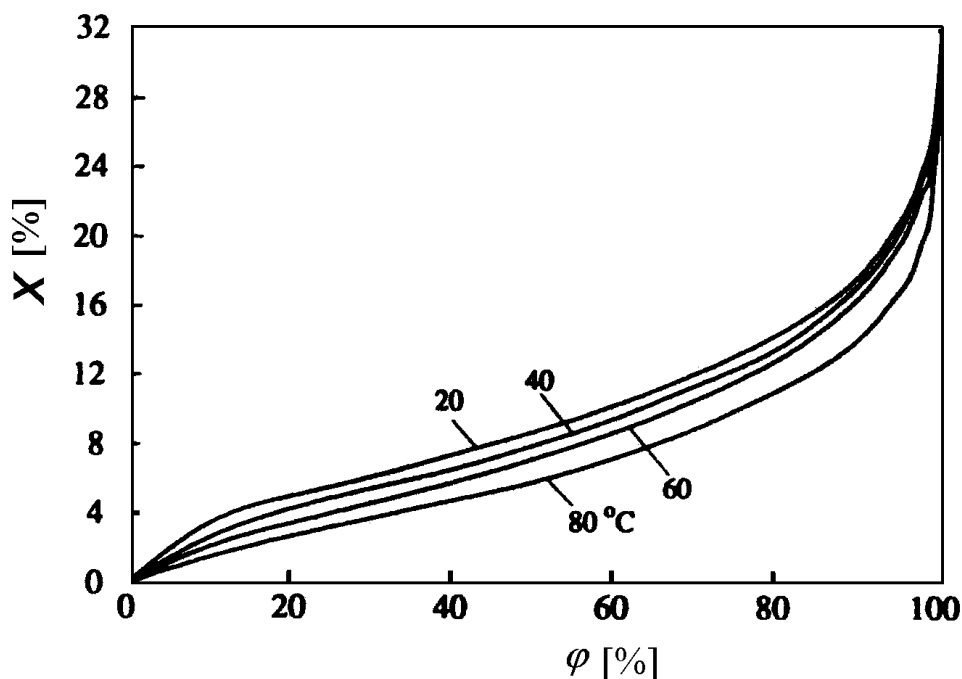


Abbildung 3.21: Sorptionsisotherme des Rohpapiers [Hei92]

Im Rohpapier werden die hygroskopischen Eigenschaften lediglich durch den Faseranteil $m_{P,cell}$ bestimmt. Die mineralischen Füllstoffe verhalten sich in dieser Hinsicht passiv. Daher wird in Gleichung 167 statt des herkömmlichen Feuchtigkeitsmaßes X_P ein rein auf das Fasermaterial bezogener, reduzierter Wert

$$X_{P,red} = X_P \frac{m_P}{m_{P,cell}} \quad (168)$$

verwendet.

Der Partialdruck $P_{V,P}$ von Wasserdampf im Rohpapier berechnet sich aus der Dampfdruckkurve (Gleichung 163) und der Sorptionsisotherme (Gleichung 167) mit

$$P_{V,P} = \varphi P_V \quad (169).$$

Aufgrund der Clausius-Clapeyron'schen Beziehung zwischen der Dampfdruckkurve und der Verdampfungswärme,

$$\frac{\partial P_{V,P}}{\partial T} = \frac{\Delta H}{T \Delta V} \quad (170),$$

lässt sich die Sorptionsenthalpie ΔH_{sorp} berechnen. Die Herleitung der Beziehung wird unter der Annahme durchgeführt, dass das Volumen der Flüssigkeit V_W vor dem Phasenwechsel vernachlässigbar gegenüber dem entstehenden Dampfvolumen V_V ist. Die Volumenexpansion bei der Verdampfung kann als

$$\Delta V = V_V - V_W \approx V_V$$

berechnet werden. Außerdem wird angenommen, dass sich der Wasserdampf wie ideales Gas verhält. Daraus ergibt sich

$$\Delta H_{sorp} = -R_V \frac{\partial(\ln \varphi)}{\partial(1/T)} \Big|_{X=const} \quad (171).$$

Durch Einbeziehung des Sorptionsgleichgewichts aus der Gleichung 167 kommt man schließlich zu dem Ausdruck für die Sorptionsenthalpie

$$\Delta H_{sorp} = -R_V \frac{1-\varphi}{\varphi} C_3 X_P^{C_4} T_P^2 \quad (172)$$

des Rohpapiers (Abbildung 3.22).

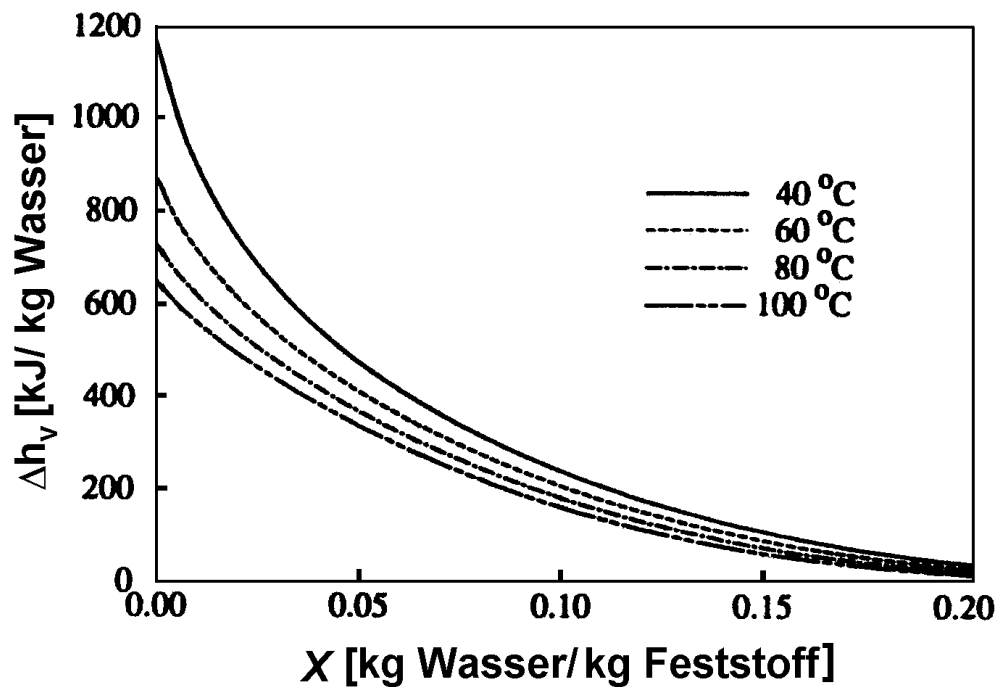


Abbildung 3.22: Sorptionsenthalpie des Rohpapiers [Hei92] mit $\Delta h_v = \Delta H_{sorp}$.

Sorptionskinetik: Partialdruck

Wegen schneller Änderungen von Temperatur und Feuchte im gestrichenen Papier kann man davon ausgehen, dass sich das Sorpti-

ongleichgewicht nicht instantan einstellen kann [Pra68], Lam79, New56, Chr60, SaC64]. Vielmehr kommt es bei Desorptionsvorgängen zu einer Absenkung des Partialdruckes unter das Gleichgewichtsniveau. Ein Modellansatz muss dabei berücksichtigen, dass sich mit steigender Feuchtigkeit des Rohpapiers der Sorptionsgleichgewicht schneller einstellen kann. Im Sättigungszustand geschieht dies instantan [Ram90]. Nähert sich die Papierfeuchte X_P dem Nullpunkt, so geschieht das Gleiche mit dem Partialdruck

$$\lim_{X_P \rightarrow 0} \varphi = 0 \quad \text{bzw.} \quad \lim_{X_P \rightarrow 0} P_{V,P} = 0.$$

Die Einstellung des Gleichgewichts erfolgt dabei nur langsam.

Beide oben genannte Bedingungen können durch einen linearen Ansatz

$$P_{V,P} = \varphi^2 P_V \tag{173}$$

zur Modifikation der Gleichung 169 erfüllt werden, da die relative Feuchte eine Funktion im Wertebereich $0 \leq \varphi \leq 1$ ist.

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärme des feuchten Rohpapiers berechnet man als massengewichtete Summe über alle seine Komponenten:

$$c_P = \sum \frac{m_i}{m_P} c_{Pi} \tag{174}$$

Die Wärmekapazitäten der festen Bestandteile von Rohpapier betragen $c_{P,cell} = 1.4 \text{ kJ/kg}$ für die Fasern [LGK75, OLB89, PaK96, KLH89] und $c_{P,cell} = 1.0 \text{ kJ/kg}$ für die Füllstoffe [Bar77, VDI83].

Die beiden Wärmekapazitäten steigen zwar um 10 bis 20 %, wenn man die Temperatur von 20 auf über 100 °C erhöht. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Wärmekapazität beträgt aber auch 10 bis 15 % [LGK75, OLB89, PaK96, KLH89]. So werden in dieser Arbeit Mittelwerte der spezifischen Wärmekapazitäten verwendet.

3.5.4 Strich und Serum

Sorptionsisotherme: Partialdruck

Die Sorptionseigenschaften von unterschiedlichen Streichfarben wurden in [Hei92] messtechnisch untersucht. Es ergab sich, dass im Bereich hoher Feuchtigkeiten keine der untersuchten Streichfarben hygroskopische Eigenschaften aufwies. Erst im Falle sehr niedriger Feuchten von ca. 2 bis 4 kg H₂O/kg Feststoff zeigte sich eine Reduktion des Dampfdruckes gegenüber dem von freiem Wasser. Demnach kann der Strich im wesentlichen Bereich seiner Austrocknung als nicht hygroskopisch angesehen werden.

Immobilisierungspunkt der Streichfarbe

Die Bestimmung des Immobilisierungspunktes X_{immo} einer Streichfarbe mit eigens entwickelten Versuchen wird im Abschnitt 4.2 geschildert. Er befindet sich in der Regel in der Spanne zwischen 79 und 86 %.

Spezifische Wärmekapazität des Striches

Die spezifische Wärmekapazität des Striches berechnet man in Analogie zum Vorgehen beim Rohpapier (Gleichung 3.150). Die spezifische Wärmekapazität des Feststoffs im Strich ist dabei sehr ähnlich der bei den Füllstoffen im Papier.

Viskosität des Serums

Die Methode zur Gewinnung von Serum sowie die Messung seiner Viskosität werden im Abschnitt 4.3 behandelt. Bei Raumtemperatur beträgt die Viskosität für unterschiedliche Streichfarben das 5 bis 50fache der Viskosität von Wasser. Der Verlauf der Viskosität mit der Temperatur kann, wie Abbildung 3.23 zeigt, durch das Verhalten von Wasser beschrieben werden.

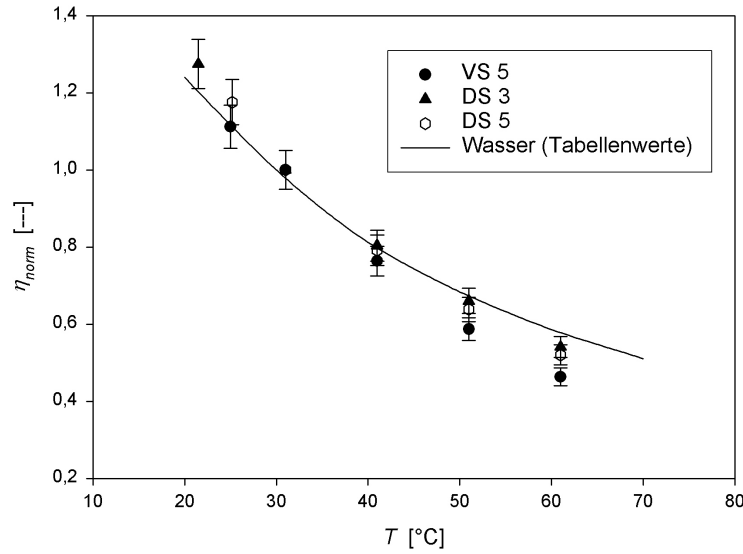


Abbildung 3.23: Verlauf der normierten kinematischen Viskosität des Serums unterschiedlicher Streichfarben (VS 5, DS 3, DS 5) über die Temperatur im Vergleich zum Wasser. Alle Werte der Viskosität wurden bei 30 °C auf den Wert 1 normiert. Der Messfehler für die Viskosität entstammt der Streuung der Messwerte und beträgt $\pm 5\%$.

Die Korrelation für die Viskosität von Wasser lautet

$$\log_{10} \frac{\eta_W}{\eta_W(20^\circ\text{C})} = \frac{1.3272(20^\circ\text{C} - T) - 0.001053(T - 20^\circ\text{C})^2}{T + 105^\circ\text{C}} \quad (175)$$

mit $\eta_W(20^\circ\text{C}) = 1002.6 \text{ kg/ms}$ im Bereich von 20 bis 100 °C [Wea82]. Die Temperatur T wird in °C eingetragen. Der maximale Fehler der Gleichung 175 gegenüber Tabellenwerte [VDI83] beträgt etwa 0.05 %.

4 Messmethoden zur Bestimmung von Prozessparametern

Das in Kapitel 3 beschriebene physikalische Modellsystem erfordert die Eingabe von Parametern, die zum Teil nur durch Messungen erfasst werden können. Die klassisch angewandten Messmethoden sind aber oft nicht in der Lage, die benötigten Größen mit ausreichender Genauigkeit zu liefern. An deren Stelle kommen neue Messtechniken zum Einsatz, deren Besonderheiten in diesem Abschnitt beschrieben werden.

4.1 Penetration

Die Penetration ist stark von der Geschichte des Streichvorgangs abhängig. Durch die Entwässerung erhöht sich der Feststoffanteil im Strich, wodurch sich seine Laufeigenschaften, die Rheologie und das Wasserrückhaltevermögen ändern [WiH97, BWH97]. Der dynamisch bedingte Druck im Coater beschleunigt die Penetration [LeE93a, LeE96]. Die dabei in das Rohpapier eindringende flüssige Phase verdrängt und komprimiert die Luft in den Porenräumen. Am Austritt des Coaters entspannt sich diese Luft wieder, so dass dadurch die Flüssigkeit aus dem Papier zurück in den Strich transportiert werden könnte [BHW97].

Typisch für diese Vorgänge ist, dass sie sich nicht unter Laborbedingungen reproduzieren lassen. Daher müssen die Parameter der Penetration (Abschnitt 3.3.3.2) an laufenden Maschinen gemessen werden, z. B. durch Scrape-Off-Methoden. Die Zielgröße der Messungen ist der Feststoffgehalte von Strichproben, die an verschiedenen Stellen in der Streichmaschine genommen werden. Dadurch

kann der Verlauf der Penetration entlang der Maschine rekonstruiert werden (Gleichung 97).

4.1.1 Die klassische Scrape-Off-Methode

Es gibt zur Zeit keine kommerziell angebotenen Systeme, die den Wassergehalt des Strichs an laufenden Streichmaschinen messen könnten. Die Oberflächenfeuchte kann zwar mit der Reflektivität des Strichs korreliert werden [AAB02]. Die Methode wäre aber erst nach umfangreicher Kalibration anwendbar, die an Streichmaschinen für jede Streichfarbe-Papier-Kombination einzeln durchgeführt werden müsste.

Die einzige zuverlässige Methode für die Feuchtemessung des Strichs ist die Probenahme durch Abstreifen: Scrape-Off [EnR86, FFS89, FFK91, Hei92]. Bei der klassischen Methode wird der Strich durch Andrücken einer breiten Klinge von der laufenden Papierbahn abgeschabt (Abbildung 4.1). Die Masse der dabei entnommenen Probe beträgt einige Gramm. Die Bestimmung der Feuchte erfolgt gravimetrisch.

Diese Technik weist aber gravierende Mängel auf:

- Die Gefahr von Bahnabrissen durch starke mechanische Beanspruchung des Papiers ist beim klassischen Scrape-Off sehr hoch.
- Die Probenahme kann ausschließlich an Stützwalzen erfolgen.
- Die Methode ist nur bei ausreichender Dicke und Fließfähigkeit des Striches anwendbar. Ansonsten gelingt das Abschaben einer ausreichenden Probemenge nicht. Die erforderliche Fließfähigkeit kann oft erst bei übermäßig hohen Strichgewichten erreicht werden. Außerdem ist der Feststoffgehalt-

Bereich, bei den man Proben entnehmen kann, stark eingeschränkt. Damit ist die klassische Methode nur bedingt praxisnah.

- Für die Entnahme der Proben (einige Gramm) benötigt man lange Abschabezeiten. Dies führt bei Pilotversuchen zu einer geringen Anzahl von Proben.
- Die manuelle Probenahme geht mit zeitlich ungleichmäßiger Anpresskraft des Schabers einher – wegen der langen Abschabezeit unterliegen die Messergebnisse starken Schwankungen.

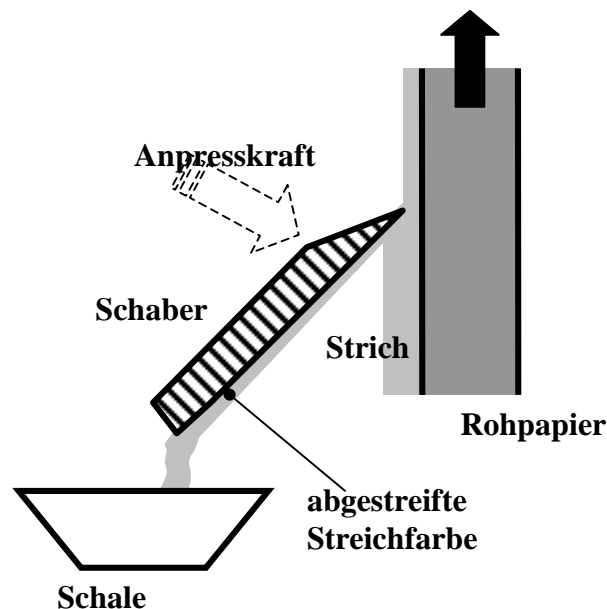


Abbildung 4.1: *Prinzipskizze der klassischen Scrape-Off-Methode. Der Strich wird durch das Andrücken einer breiten Klinge von der laufenden Papierbahn abgeschabt. Die Probe wird in einer Schale aufgefangen.*

4.1.2 Soft-Scrape

Zur Behebung der Nachteile des klassischen Scrape-Off-Verfahrens wird eine Abwandlung der Probenahme eingeführt: Soft-Scrape. Hier wird statt des starren Schabers eine flexible Klinge für die Probenahme verwendet: Eine Schlinge aus transparenter Kunststoffolie.

Die Transparenz der Klinge erlaubt die optische Kontrolle der sich ansammelnden Probemenge während des Abschabens. Die neue, der Laufrichtung des Papiers entgegengesetzte Anordnung der Klinge ermöglicht eine verbesserte Abtrennung von Strich. Dank der schmalen Berührungsspur (1 bis 2 mm) des Schabers sinkt die mechanische Belastung der Papierbahn erheblich.

Man kommt bei dieser Methode auf geringere Probemengen als beim herkömmlichen Verfahren. Etwa 100 mg genügen für die gravimetrische Bestimmung der Feuchte mittels analytischer Waage (Messgenauigkeit 0.1 mg): Der Messfehler durch das Wiegen beträgt dann wenige Prozent.

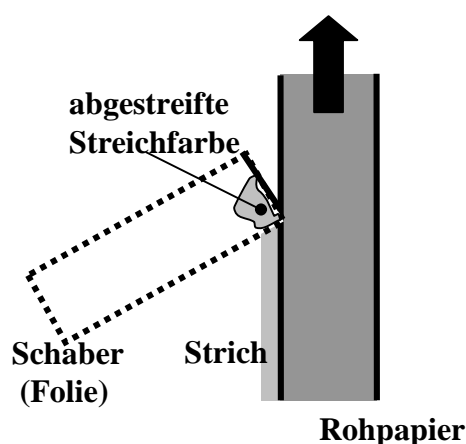


Abbildung 4.2: *Prinzipskizze des Soft-Scrape-Verfahrens. Hier wird eine flexible Klinge für die Probenahme verwendet, wodurch das Abschaben der Streichfarbe unter schonenden Bedingungen ermöglicht.*

Mit der Anwendung der Soft-Scrape-Technik verschwinden die wesentlichen Nachteile der klassischen Methode:

- Die Gefahr von Bahnabrissen ist praktisch nicht vorhanden.
- Das Abschaben kann unabhängig von Stützwalzen erfolgen.
- Die Methode ist bei praxisnahen Strichgewichten ohne Einschränkungen anwendbar (z. B. 6 g/m²).

- Das Abschaben kann fast bis zum Immobilisierungspunkt des Striches durchgeführt werden. Der maximale Feststoffgehalt der vermessenen Proben lag um 81 Gew.-%.
- Die Anwendbarkeit ist bei allen Arten der Strichauftragung gewährleistet.
- Der Schaber entfernt ein Großteil des Striches vom Papier (Abschnitt 4.4). Strichreste bleiben nur noch in den Rautiefen des Papiers haften.
- Die erforderliche Probemenge erhält man in wenigen Sekunden.
- Die Messergebnisse unterliegen dank kurzer Abschabezeiten deutlich geringeren Schwankungen als bei der klassischen Methode.

Zur Vorbereitung der Messungen werden die Klingen (Kopierfolie, 15 x 50 mm) zugeschnitten und in gas- und wasserdichte Rollrandgläschen verpackt. Die verschlossenen Gläschen werden numeriert, anschließend wird ihre Masse bestimmt.

Zum Abschaben wird die Folie aus dem Gläschen entnommen. Daraus formt man eine Schlinge, die an die laufende Papierbahn gedrückt wird, so dass sich die entnommene Strichmenge in ihrer Biegung ansammelt. Die Handhabung der Klinge soll mit einem Latexhandschuh geschehen, damit die Folie trocken bleibt. Bei den kleinen Strichmengen, die abgeschabt werden, könnten sonst Spuren von Feuchtigkeit die Ergebnisse verfälschen.

Nach der Probenahme muss die Klinge samt Strichprobe sofort wieder in das zugehörige Gläschen gegeben und verschlossen werden, damit der Wassergehalt der Probe unverändert bleibt. Ansonsten kann der Feststoffgehalt durch Verdunstung schnell verfälscht werden. Das Gewicht der Muster (Gläschen + Folie + Strich) wird an einer Analysewaage (Genauigkeit 0.1 mg) bestimmt. Anschließend

werden die Gläschen geöffnet und 2 Stunden auf 110-120 °C im Ofen getrocknet. Nach der Trocknung müssen die Proben im Exsikkator abkühlen, bevor sie wieder verschlossen und gewogen werden können. Schließt man die Gläschen im warmen Zustand, so wiegen sie wegen der geringeren Dichte der warmen Luft weniger als wenn sie kalt verschlossen wären. Dadurch kann ein Fehler von einigen Milligramm entstehen, der bei kleinen Probemengen kritisch ist.

Wie oben erwähnt, beträgt der Fehler bei der Bestimmung des Trockengehaltes der Proben durch Wiegen mit einer Analysewaage wenige Prozent. Es wurde allerdings festgestellt, dass die Streuung der Messwerte am gleich bleibenden Messpunkt etwa $\pm 0.15 \text{ g/m}^2$ penetrierter Flüssigkeit beträgt. Dieser Fehler entsteht durch die Schwankungen in der Anpressung der Klinge auf die Papierbahn bei manueller Probenahme.

4.1.3 Penetrationstiefe

Dieses Kapitel behandelt die Frage nach der Eindringtiefe des penetrierten Serums ins Rohpapier (Penetrationstiefe). Dazu werden die untersuchten Streichfarben mit einem Tracer versetzt, der zusammen mit dem Serum ins Papier transportiert wird und dort die Penetrationszone markiert. Nach der Trocknung wird der untersuchte Papierquerschnitt unter einem Auflichtmikroskop ausgewertet.

Als Tracer wurde der blaue Farbstoff Methylblau verwendet (Colour Index No.: 42780, Colour Index Name: Acid blue 93, nicht Methylenblau!!!). Dieser Tracer wurde ausgewählt, da seine wässrige Lösung bei seinem Aufsaugen ins Rohpapier keine Entmischungstendenzen zeigt – die Farbe wandert zusammen mit der Wasserfront.

Außerdem verliert Methylblau seine blaue Färbung in der basischen Umgebung der Streichfarbe (pH 8.5-9.5) fast vollständig. So muss keine Farbkontamination der Streichmaschine befürchtet werden.

Das entfärbte Methylblau gewinnt seine Farbe zurück, wenn Proben mit Säure behandelt werden. Dies gilt auch für getrocknete Muster. Die Wiedereinfärbung kann z. B. durch Bedampfung mit Ameisensäure durchgeführt werden. Die Behandlung mit flüssigen Säuren wurde vermieden, da diese die Farbfront verwaschen und die Probe durch Ätzen Beschädigen könnten.

Für die Untersuchung der Penetrationstiefe wurden folgende Pilotversuche durchgeführt:

- Streichmaschine: VSM2 (VOITH Paper, Heidenheim)
- Coater: JetFlow F
- Bahngeschwindigkeit: 1000 m/min
- Streichfarbe:
 - 100 Teile Carbonat
 - 10 Teile SB Latex
 - 7 Teile Stärke
 - Feststoffgehalt: 65 Gew.-%
- Tracer: 1.5 g Methylblau pro Liter Streichfarbe
- Strichgewicht: 8 und 10 g/m²
- Rohpapier: 47 g/m² holzhaltig, von Stora Enso Kabel

Für die mikroskopische Auswertung der Penetrationstiefe werden die Muster durch eine spezielle Schnittechnik vorbereitet. Dazu werden die Papiermuster in eine Klemmvorrichtung (Abbildung 4.3) eingespannt. Die Klemmbanken weisen eine geschliffene obere Fläche auf, in deren Ebene mit einer Skalpellklinge eine saubere Schnittfläche erzeugt werden kann.

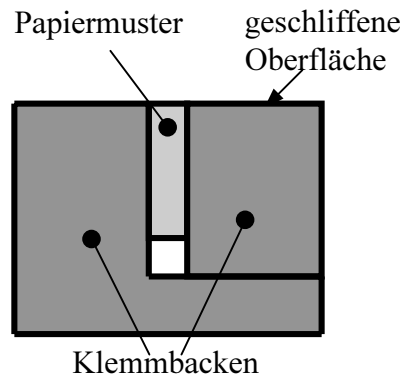


Abbildung 4.3: *Prinzipische Skizze der Klemmvorrichtung: Die Querschnitte für eine mikroskopische Untersuchung können durch Abscheren der eingespannten Papiermuster erzeugt werden.*

Nach der Erzeugung einer ebenen Schnittfläche muss der Tracer sichtbar gemacht werden. Die erforderliche Bedampfung mit Säure kann in der Klemmvorrichtung erfolgen, die danach als Objektträger unter dem Mikroskop dient.

Unter 200 bis 500facher Vergrößerung ist unter dem optischen Auflichtmikroskop Folgendes zu beobachten: Der Tracer bleibt weitgehend im Strich. Unter dem Strich bildet sich eine dünne Penetrationszone, deren Dicke wenige μm beträgt. Die unterhalb der Penetrationszone liegenden Bereiche des Rohpapiers erhalten durch Penetration kein Serum und somit keinen Tracer.

Wegen der geringen erzielten Kontraste und Ungleichmäßigkeit der Schnittflächen können an dieser Stelle keine Bilder der Penetrationszone pilotgestrichener Papiere dargestellt werden. Eine gleichmäßige, ebene Schnittfläche vom Papierquerschnitt, notwendig für gute Auflösung unter 500facher Vergrößerung, kann nur bei mit Burn-Out behandeltem Papier erzielt werden [Dob75]. Beim Burn-Out wird allerdings der Tracer zerstört. So musste die unregelmäßige Struktur der Schnittfläche, die nicht in einer Fokusebene lag, mit Fokusverschiebung betrachtet werden, was zwar eine optische Erfassung erlaubt, aber keine aussagekräftigen Fotos liefern kann.

Als Alternative für die fehlenden Bilder aus Pilotversuchen kann die Ausbildung der Penetrationszone aufgrund von Laborversuchen untersucht werden. Mit 3 g/l Tracer versetzte Streichfarbe wird dabei im Überschuss auf Rohpapier aufgetragen. Nach einer definierten Zeit wird die noch nicht verfestigte Streichfarbe von der Papieroberfläche beseitigt. Nach der Trocknung wird das Papier aufgeschnitten und unter dem Mikroskop untersucht. In Abbildung 4.4 wird ein 80 g/m² holzhaltiges Rohpapier dargestellt, das einer 20 s dauernden Penetration unterzogen wurde. Die Penetrationszone erscheint als 10 bis 15 µm dicker, kompakter, dunkler Streifen, sichtbar gemacht durch Ablagerung von Tracer. Der Rest des Rohpapiers wird von der Penetration nicht erreicht.

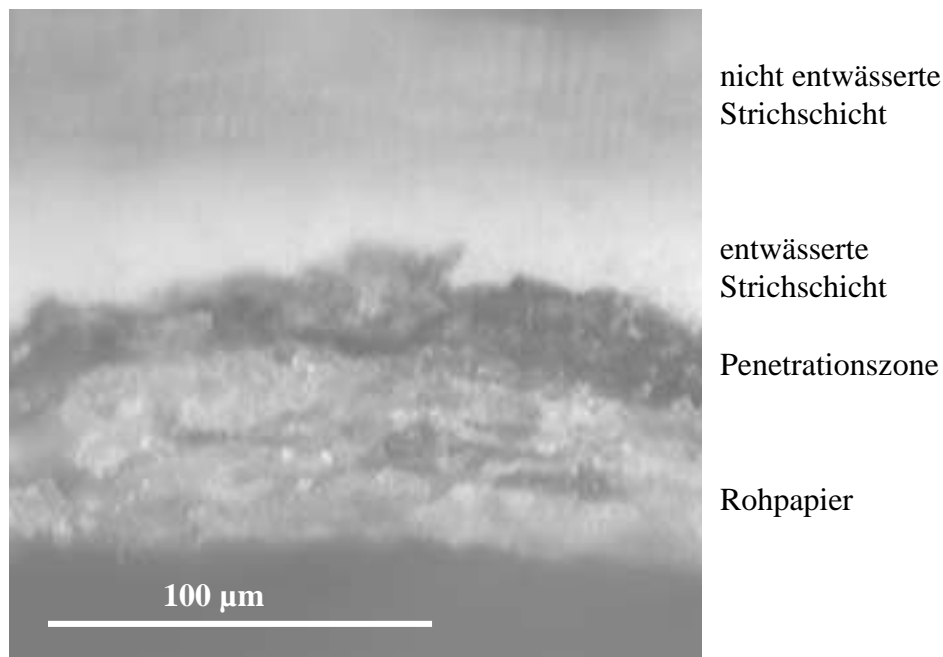


Abbildung 4.4: *Penetrationszone bei laborgestrichenem Papier. Die Penetrationszone erscheint als dunkler Streifen, sichtbar gemacht durch Ablagerung von Tracer. Die Penetration ereignet sich aus der Strichschicht unmittelbar über dem Rohpapier. Diese verliert Flüssigkeit, so dass die Tracer-Konzentration in diesem Grenzbereich erheblich sinkt. Diese Zone erscheint daher im Bild wesentlich heller als die darüber liegende, nicht entwässerte Strichschicht, die ihren Traceranteil behält.*

Die Penetration ereignet sich aus der Strichschicht unmittelbar über dem Rohpapier. Diese verliert Flüssigkeit, so dass die Tracer-Konzentration in diesem Grenzbereich erheblich sinkt. Diese Zone erscheint daher im Bild wesentlich heller als die darüber liegende, nicht entwässerte Strichschicht, die ihren Traceranteil behält. Abbildung 4.4 bestätigt, dass die Penetration aus einer rohpapiernahen Strichschicht entspringt, die sich durch Ausbildung eines „Filterkuchens“ allmählich in höhere Strichregionen fortpflanzt. Das penetrierte Serum sammelt sich in einer dünnen, kompakten Zone an der strichseitigen Oberfläche des Rohpapiers an.

4.1.4 Funktionsweise der Soft-Scrape-Methode

Die Soft-Scrape-Methode dient zur Messung der Penetration von Serum aus der Streichfarbe in die Papierbahn. Dabei wird mit einer elastischen Klinge Streichfarbe von der Paperoberfläche abgeschabt und deren Wassergehalt bestimmt. So kann die Entwässerung des Striches entlang einer Streichmaschine beobachtet werden. Bei der Modellbildung (Abschnitt 3.3.3) wird angenommen, dass durch die Messung die gesamte Strichdicke erfasst wird. Durch Beobachtung der Spuren der Strichabnahme auf der Papierbahn kann untersucht werden, inwieweit beim Abschaben der gesamte Strich von der Paperoberfläche entfernt werden kann.

Die folgenden pilotgestrichenen Papiere wurden für die Untersuchungen verwendet:

- Streichmaschine: VESTRA München
- Strichauftragung: JetFlow F
- Bahngeschwindigkeit: 1000 m/min

- Streichfarbe:
 - 100 Teile Carbonat
 - 10 Teile SB Latex
 - 7 Teile Stärke
 - 0.15 Teile CMC
 - Feststoffgehalt: 62 bis 67 %
 - Immobilisierungspunkt: 86 %
- Strichgewicht: 12 g/m²
- Rohpapier: holzhaltig, 47 g/m² otro, von Stora Enso Kabel

Die Strichabnahme erfolgte bei laufender Maschine an Stützwalzen, im ersten Abschnitt der Maschine ohne eingeschaltete Trocknung. Die entsprechenden Stellen wurden nach dem Streichgang offline lokalisiert und daraus Muster für Laboruntersuchungen genommen.

Als erstes wird das Abschaben direkt nach der Strichauftragung untersucht:

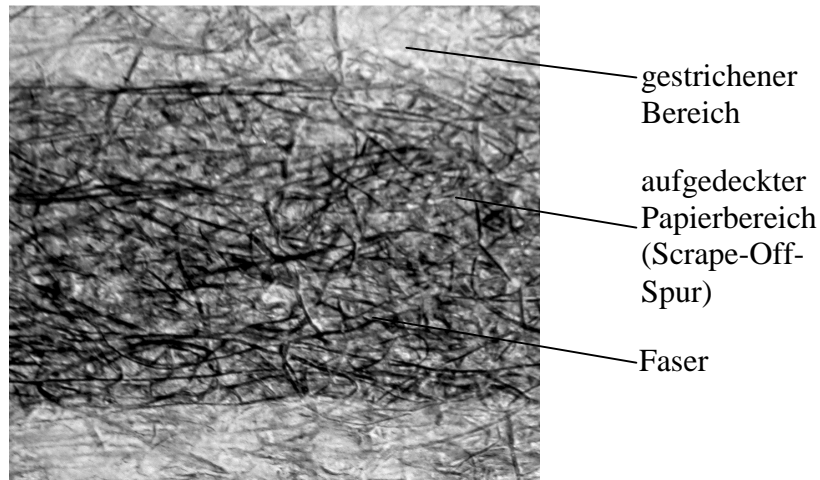


Abbildung 4.5: Draufsicht einer horizontal verlaufenden Scrape-Off-Spur direkt nach dem Strichauftrag (Spurbreite ca. 2 mm). Die Papierstruktur wird beim Abschaben der Streichfarbe im hohen Maße freigelegt.

Die Draufsicht einer Spur unter dem Stereomikroskop zeigt Abbildung 4.5. Das Kontrastieren der Probe erfolgte mit der Burn-Out-Technik [Dob75]. Die Scrape-Off-Spur steht durch die aufgedeckte Papierstruktur im deutlichen Kontrast zu den gestrichenen Berei-

chen. Die obersten Faser werden beim Abschaben vollkommen freigelegt, ebenso wie Bereiche, die sich durch etwas dunklere Farbe abzeichnen. Bezogen auf die ganze Spur wird der Strich aber nicht vollkommen vom Papier entfernt. Dies wird in Abbildungen 4.6 und 4.7 noch deutlicher. Etwas Strich bleibt immer in den Rautiefen des Rohpapiers übrig. Die Flocken und hoch stehende Fasern werden dagegen vollständig von Streichfarbe befreit. Diesbezüglich ergeben die Untersuchungen keinen nennenswerten Unterschied durch eine Veränderung des Feststoffgehaltes der Streichfarbe zwischen 62 und 67 %.

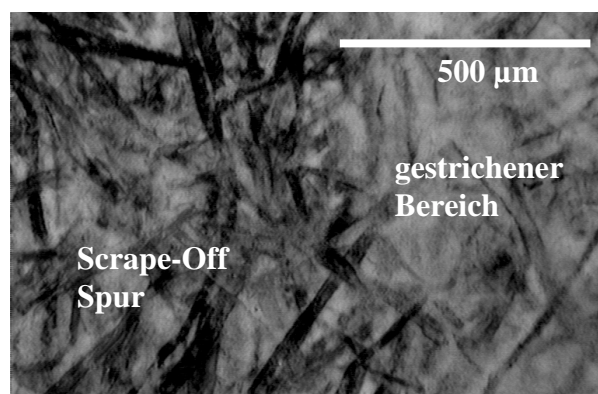


Abbildung 4.6: Draufsicht einer Scrape-Off-Spur direkt nach dem Strichauftrag (Vergrößerung 50x). Die freigelegten Faser werden hier deutlich sichtbar.

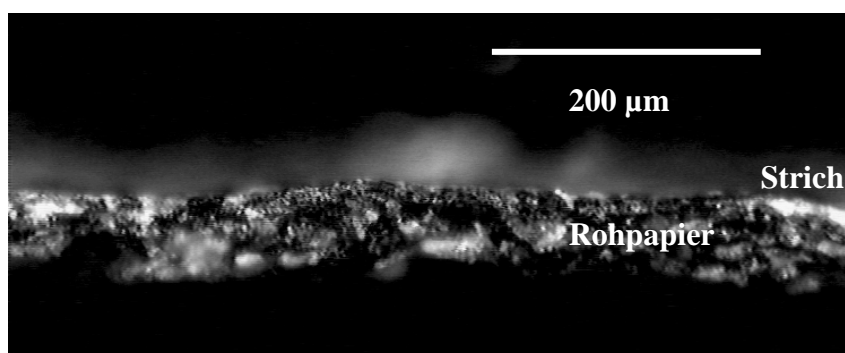


Abbildung 4.7: Querschnitt einer Scrape-Off-Spur direkt nach dem Strichauftrag (Vergrößerung 100x). Auf der abgeschabten Stelle verbleiben nur Spuren der Streichfarbe.

Die Effizienz der Soft-Scrape-Methode kann beim Abschaben ohne die Stützwirkung einer Leitwalze beeinträchtigt werden. Auf frei laufender Bahn kann die Probenahme nur unter schwacher Anpressung des Schabers erfolgen, da es ansonsten zum Bahnabriss kommen kann. Die Verringerung der Anpressung bedeutet wiederum, dass das Papier unter der Klinge weniger komprimiert wird. Dadurch wird die Rauigkeit weniger geglättet, so dass aus den Rautiefen des Rohpapiers weniger Streichfarbe entnommen werden kann (Abbildung 4.8). Außerdem verschmälert sich bei geringerer Anpressung die Scrape-Off-Spur, da die verwendete Folienklinge elastisch ist.



Abbildung 4.8: Draufsicht einer Scrape-Off-Spur, erzeugt auf frei laufender Bahn ca. 15 m nach dem Strichauftrag (Breite ca. 0.5 mm)

Abbildung 4.8 zeigt allerdings, dass sich auch in diesem Fall, d. h. für fortgeschrittene Penetration und Abschaben auf frei laufender Bahn, an der Wirkungsweise der Scrape-Off-Methode nichts ändert. Abbildung 4.9 illustriert den entsprechenden Papierquerschnitt.

Aus obiger Schilderung kann man folgern, dass durch den aufgeprägten Druck die Oberfläche des Papiers fast vollständig vom Strich freigelegt wird. Dies gilt für die hochstehenden Fasern bzw. die Flocken. Das Papier wird komprimiert und vorübergehend geglättet, so dass auch ein Teil des Striches aus den Rautiefen abge-

schabt werden kann. Die Anwendung vom höchstmöglichen Druck ist vorteilhaft, da auf diese Weise der Strich am vollständigsten abgenommen werden kann.



Abbildung 4.9: Querschnitt einer Scrape-Off-Spur, erzeugt auf frei laufender Bahn ca. 15 m nach dem Strichauftrag; 100x Vergrößerung

Die Auswertung zeigt auch, dass sich auf dem Rohpapier keine immobilisierte Schicht gebildet hat, die durch ihre Festigkeit nicht abgeschabt werden könnte.

Bei der Auswertung der Penetrations-Messungen wird angenommen, dass der abgeschabte Teil der Streichfarbe für die gesamte aufgetragene Schicht repräsentativ ist. Dies ist wiederum unter der Annahme gerechtfertigt, dass die Penetration gleichmäßig über die Papieroberfläche erfolgt. So ist es gleichgültig, von welcher Stelle auf dem Papier der Strichmuster genommen wird, ob von hoch oder tief liegenden Stellen. Die angenommene Gleichmäßigkeit der Penetration wird durch die ebene Verteilung der Faserdichte für alle Papierbereiche bestätigt [RHR01]. Versuche mit einer Apparatur für die Bestimmung der lokalen Saugfähigkeit der Papieroberfläche zeigen eine weitgehende Unabhängigkeit der Absorptivität von der Topographie und Massenverteilung des Papiers [EKO99].

4.1.5 Ergebnisse

Der Verlauf der Penetration entlang einer Streichmaschine kann mit der Soft-Scrape-Methode experimentell bestimmt werden. Sie wurde für die experimentelle Erfassung einzelner Streichfarben an laufenden Maschinen entwickelt.

Im Allgemeinen kann man über das Penetrationsverhalten sagen, dass die Zeitverläufe für unterschiedliche Streichfarben voneinander abweichen [Hei92]. In Abbildung 4.10 wurde die Penetration aus zwei beliebig gewählten Streichfarben, einem Vor- und einem Deckstrich, dargestellt. Der Unterschied im Verhalten dieser beiden Streichfarben ist allerdings nicht auf alle Vor- und Deckstriche zu verallgemeinern. Die Penetrationskurven hängen von der jeweiligen Kombination Papier-Strich ab und müssen individuell ausgewertet werden. Eine zuverlässige Vorhersage aufgrund der Informationen wie Zusammensetzung, Viskosität etc. ist zur Zeit noch nicht möglich.

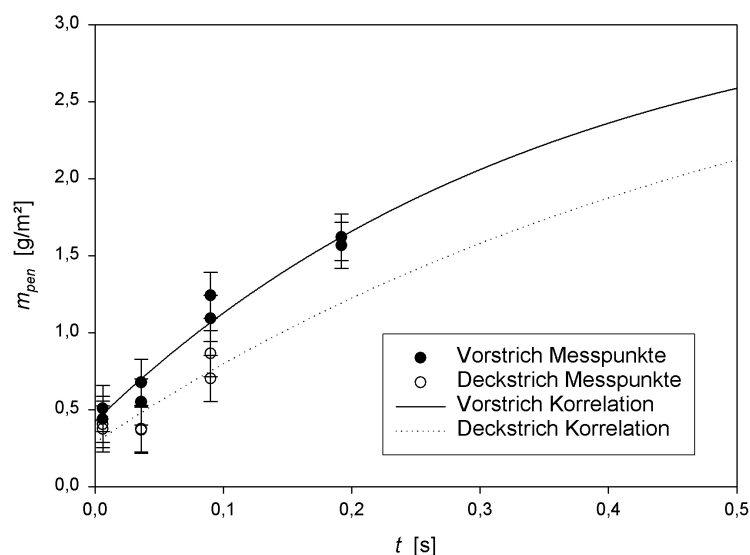


Abbildung 4.10: Abhängigkeit der Penetration von der Art der Streichfarbe am Beispiel eines Vor- und eines Deckstriches (Strichgewicht jew. 10 g/m²). Für den Messfehler siehe Abschnitt 4.1.2.

Im Folgenden wird die Abhängigkeit der Penetration vom Strichgewicht, von der Bahngeschwindigkeit und vom Feststoffgehalt der Streichfarbe untersucht.

4.1.5.1 Abhängigkeit der Penetration von Strichgewicht und Bahngeschwindigkeit

Das in Abschnitt 3.3.3.2 entwickelte Modellsystem beschreibt durch Gleichung 102 eine Abhängigkeit der Penetrationskinetik vom Strichgewicht. Demnach erfolgt die Penetration um so schneller, je weniger Strich auf das Rohpapier aufgetragen wird. Eine experimentelle Bestätigung dafür liefert Abbildung 4.11, in der die Penetrationskinetik der Strichgewichte 10 und 12 g/m² gegenübergestellt wird, mit folgenden Versuchsparametern:

- Streichmaschine: VSM2 (VOITH Paper, Heidenheim)
- Coater: JetFlow F
- Bahngeschwindigkeit: 1000 m/min
- Streichfarbe:
 - 50 Teile Carbonat
 - 50 Teile Kaolin
 - 12 Teile SB Latex
 - 0.4 Teile CMC
 - Feststoffgehalt: 64 %
- Strichgewicht: 10 und 12 g/m²
- Rohpapier: 47 g/m² holzhaltig, von Stora Enso Kabel

Die experimentell bestimmten Penetrationskonstanten aus Gleichung 97 betragen dabei $C_{pen,1} = -2.83$ bzw. -2.33 . Der Quotient aus den beiden Konstanten $C_{pen,1}(10 \text{ g/m}^2) / C_{pen,1}(12 \text{ g/m}^2)$ ergibt 1.2, was dem Strichgewicht-Umrechnungsfaktor nach Gleichung 102 entspricht.

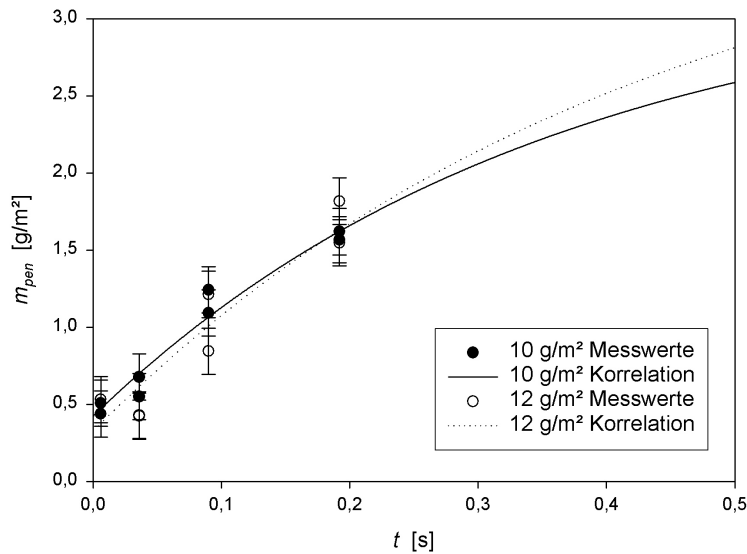


Abbildung 4.11: Abhängigkeit der Penetrationskinetik vom Strichgewicht: Je weniger Strich aufgetragen wird, desto schneller fällt seine Penetrationsrate. Für den Messfehler (Fehlerbalken) siehe Abschnitt 4.1.2.

Je weniger Strich aufgetragen wird, desto schneller wird er immobilisiert. Ein geringes Strichgewicht bedeutet jedoch gleichzeitig eine kleine Serumreserve, die durch Penetration schnell erschöpft wird. So fällt die Geschwindigkeit der Penetration mit der Zeit um so schneller ab, je kleiner das Strichgewicht ist. Diese Schlussfolgerung gilt nur im Falle konstant bleibender Qualität von Papier und Streichfarbe. Die in der Praxis üblichen Qualitätsschwankungen relativieren allerdings die durch das Modell aufgezeigten Tendenzen. Abbildung 4.12 zeigt, inwieweit Schwankungen der Rohpapierqualität die Penetration beeinflussen können.

In den zugehörigen Versuchen wurde das gleiche Material verwendet, wie in Abschnitt 4.1.3. Die Auftragung erfolgte mit Filmpresse. Abbildung 4.12 zeigt, dass fast alle Messpunkte im Toleranzbereich einer mittleren Korrelation liegen, unabhängig vom aufgetragenen Strichgewicht. Die Kinetiken der Penetration verschieben sich durch die Unterschiede im Rohpapier so stark, dass die Modellierung der

Penetrationskinetik als Funktion des Strichgewichts ihre Praxisrelevanz verliert.

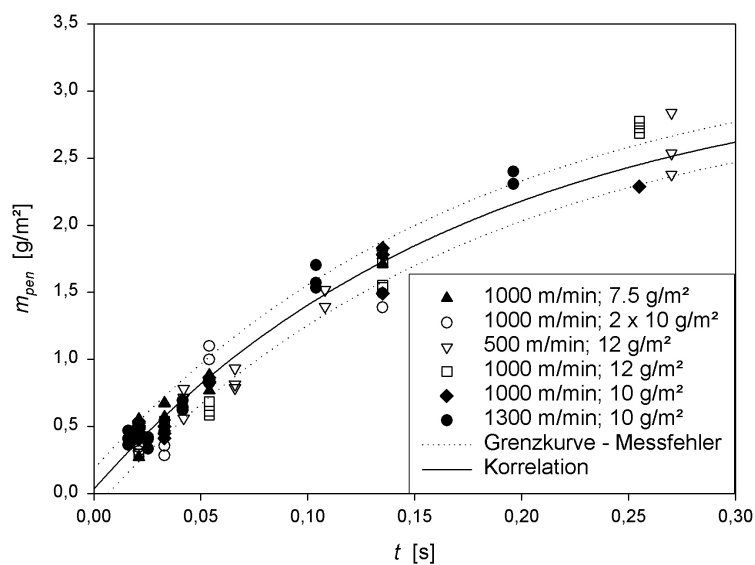


Abbildung 4.12: Die Penetrationskinetik ist praktisch unabhängig von Strichgewicht und Bahngeschwindigkeit, wegen schwankender Papierqualität.

Aus Abbildung 4.12 ist auch erkennbar, dass auch die Bahngeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Penetration hat. Dies wird aus Abbildung 4.13, die aus Abbildung 4.12 hergeleitet wurde, noch deutlicher.

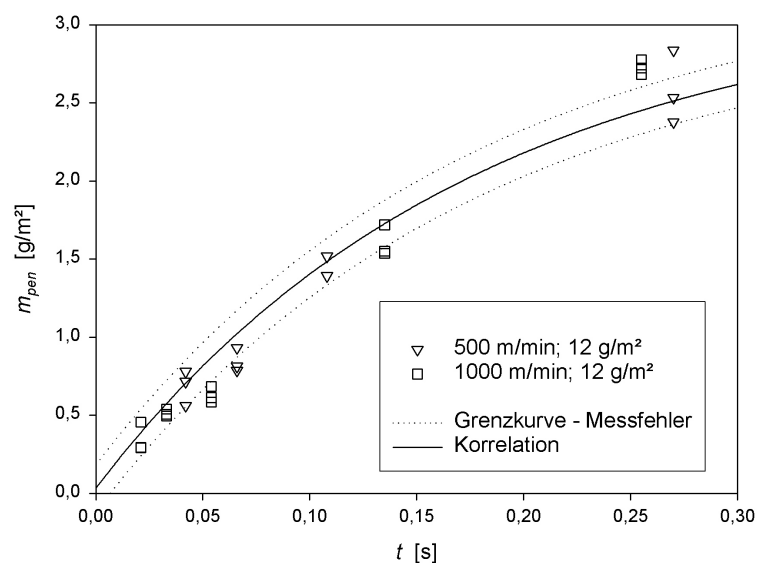


Abbildung 4.13: Die Penetrationskinetik ist unabhängig von der Bahngeschwindigkeit – Auszug aus Abbildung 4.12

4.1.5.2 Abhängigkeit der Penetration vom Feststoffgehalt der Streichfarbe

Hierbei galt es, die Abhängigkeit der Penetrationskinetik vom Feststoffgehalt der Streichfarbe experimentell zu untersuchen, da der Feststoffgehalt der Streichfarbe im vorhandenen Modellsystem nicht parametrisiert werden kann. Die Messungen wurden in Pilotversuchen durchgeführt. Die Beschreibung der Versuchsparameter entspricht denen im Abschnitt 4.1.4. Die Streichfarbe wurde von anfänglich 67.5 % Feststoffgehalt auf 65.5 % und 62 % verdünnt. Der Verlauf der Penetration wurde für jede Verdünnungsstufe gemessen und mit den anderen verglichen.

Als erstes wurde die 67.5 %-Streichfarbe in zwei Läufen getestet, mit jeweils einer Papierrolle der gleichen Sorte. In Abbildung 4.14 fällt der deutliche Unterschied zwischen den beiden Kurven auf, was den in Abschnitt 4.1.5.1 erwähnten starken Einfluss der schwankenden Papierqualität auf die Penetration untermauert.

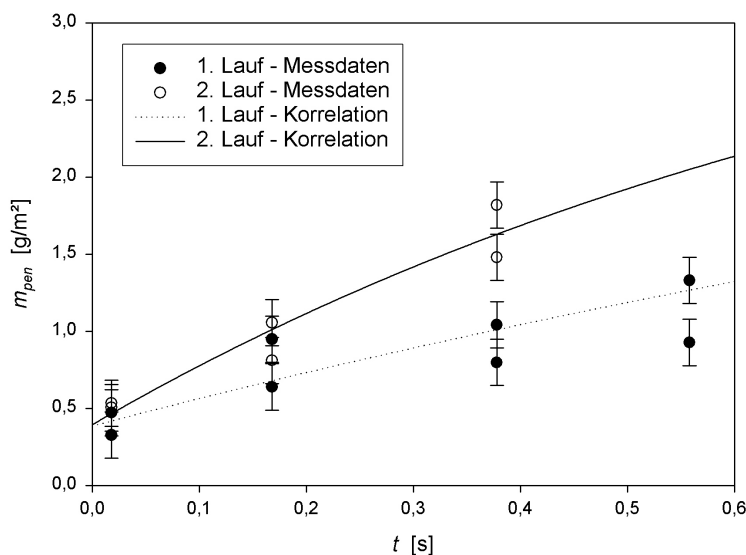


Abbildung 4.14: Unterschiede in der Penetrationskinetik hervorgerufen durch Differenzen in der Papierqualität. In beiden Fällen wurde der gleiche Strich aufgetragen: 12 g/m², 67.5 % Feststoffgehalt. Für den Messfehler (Fehlerbalken) siehe Abschnitt 4.1.2.

Da beide verwendeten Papierrollen das gleiche Flächengewicht und Feuchte hatten, könnte die entstandene Differenz z. B. durch Unterschiede in der Oberflächenporosität hervorgerufen werden. Die Penetration nach dem Blade beträgt in beiden Fällen 0.4 g/m^2 . Die Penetrationskonstanten sind -1.2 für die „schnelle“ und -0.5 für die „langsame“ Kurve.

Abbildung 4.15 zeigt die Penetrationsverläufe bei Verdünnung der Streichfarbe. Man erhält keine systematische Erhöhung der Geschwindigkeit der Penetration bei Verdünnung der Farbe wie dies ursprünglich erwartet wurde. Die Unterschiede in der Penetrationskinetik werden statt dessen überwiegend durch Unterschiede im Rohpapier verursacht und liegen im entsprechenden Streubereich. Demnach kann die Modellierung von $C_{pen,1}$ (Gleichung 97) für eine gleich bleibende Farbzeptur unabhängig vom Feststoffgehalt erfolgen.

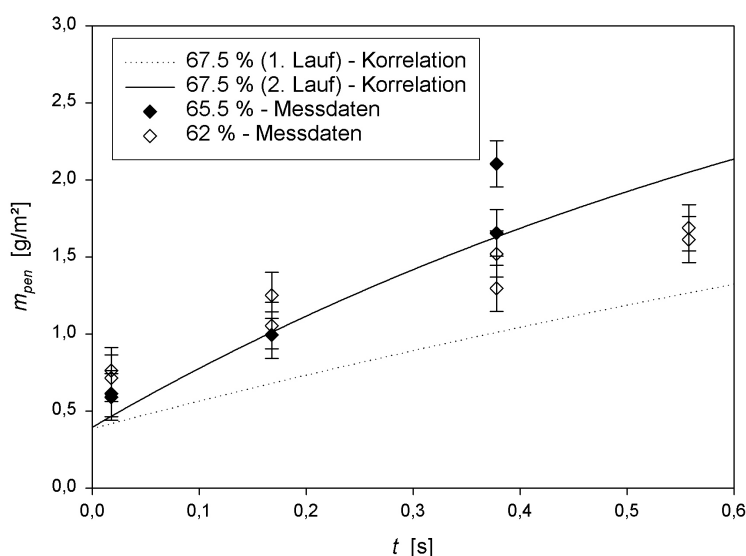


Abbildung 4.15: Verhalten der Penetration m_{pen} bei der Verdünnung einer Streichfarbe für 67.5 %, 65.5 % und 62 % Feststoffgehalt: Die Penetrationskinetik zeigt statt einer Abhängigkeit vom Feststoffgehalt nur unregelmäßiges Streuverhalten. Für den Messfehler (Fehlerbalken) siehe Abschnitt 4.1.2.

Die einzige systematisch auftretende Tendenz bei der Verdünnung von Streichfarben ist die Erhöhung der Anfangspenetration unmit-

telbar nach der Strichauftragung (Abbildung 4.16). Die Anfangspenetration wird fast verdoppelt, wenn der Feststoffanteil der Streichfarbe von 67.5 auf 62 % (d. h. um 4.5 %) gesenkt wird. Man kann daraus schließen, dass sich bei der Verdünnung der Streichfarbe um wenige Prozent keine nennenswerten Unterschiede im Penetrationsverlauf ergeben. Die auftretenden Differenzen werden durch den Rohpapier-Effekt überschattet. Die Anfangspenetration erhöht sich dagegen stark bei sinkendem Feststoffgehalt.

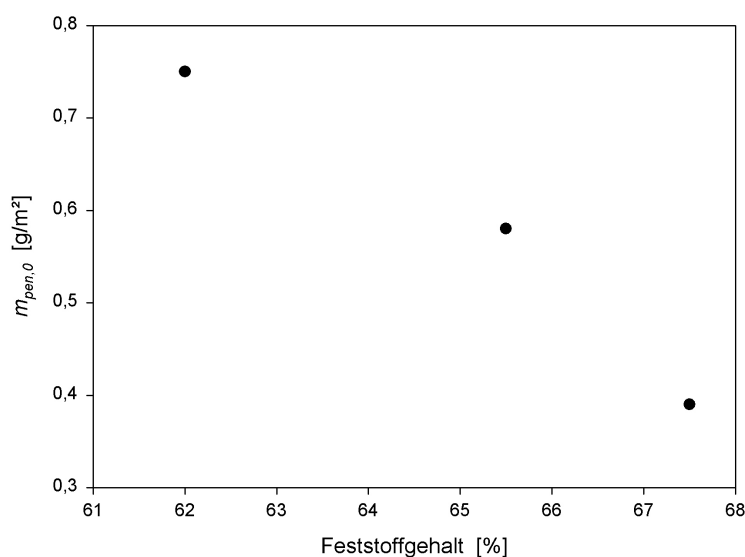


Abbildung 4.16: Verhalten der Anfangspenetration m_{pen}^0 bei der Verdünnung einer Streichfarbe für 67.5 %, 65.5 % und 62 % Feststoffgehalt

4.1.5.3 Zusammenfassung der Messergebnisse für Penetration

Die Modellparameter der Penetration $m_{pen,0}$ und $C_{pen,1}$ werden aus Versuchsergebnissen (Soft-Scrape) gewonnen. In den unten stehenden Tabellen werden exemplarisch die Penetrationseigenschaften einiger pilotgestrichener Papiere dargestellt. Alle Werte wurden dabei auf den Bezugszustand 10 g/m² Strich bei 25 °C zurückgerechnet. Das eingesetzte Rohpapier war überall das holzhaltige 47 g/m² mit ca. 3 % Feuchte von Stora Enso Kabel.

Tabelle 1 beinhaltet die Zusammensetzung der getesteten Streichfarben in der Einheit Teile otro. In der Tabelle 2 sind folgende Angaben eingetragen:

- Viskosität der Streichfarbe (Brookfield bei 100 U/min),
- Feststoffgehalt der Streichfarbe,
- Immobilisierungspunkt der Streichfarbe,
- Bahngeschwindigkeit,
- Art des Streichaggregats (Coater),
- Anfangspenetration $m_{pen,0}$,
- Geschwindigkeit der Penetration $C_{pen,1}$ und
- $\Delta C_{pen,1}$: Spanne des Schwankungsbereichs der der Penetrationsgeschwindigkeit $C_{pen,1}$ während der Messungen.

Rezeptur Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Komponentenname	Komponente [otro Teile]								
HC 60	—	100	100	—	—	—	—	—	—
HC 90	70	—	—	70	50	70	70	—	—
Lithoprint	—	—	—	—	50	—	—	—	—
HG 90	—	—	—	30	—	30	30	—	—
Capim DG	30	—	—	—	—	—	—	—	—
Latex DL 930	12	10	10	12	—	12	12	—	—
Latex DL 966	—	—	—	—	12	—	—	—	—
C-Film 07311	—	7	7	—	—	—	—	—	—
Finnfix 10	0,4	0,15	—	0,4	0,4	0,4	—	—	—
Finnfix 20	—	—	—	—	—	—	0,5	—	—
HC VB 65 GU	—	—	—	—	—	—	—	50	50
Kaolin ND 10/15	—	—	—	—	—	—	—	50	50
Baystal P 7100	—	—	—	—	—	—	—	12	12
Sterocoll BL	—	—	—	—	—	—	—	0,02	—
Sterocoll SL	—	—	—	—	—	—	—	0,5	—
Finnfix 30	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2

Tabelle 1: Rezepturen von 9 untersuchten Streichfarben mit der Angabe der Komponenten und deren Dosierung in der Einheit Teile otro.

Rezeptur Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Strich									
Brookfield-Viskosität	650	610	900	850	550	850	1350	950	950
Feststoff [%]	65	65,5	67	65	64	65	68	58	59
Immobilisierung [%]	82	86	86	83	81	83	83	79	79
W_{Bahn} [m/min]	1000	1000	1000	1000	1000- 1500	1000	1000	1600- 2000	1400- 2000
Coater	JetFlow F						MSP	JetFlow F	
Penetration									
$m_{\text{pen},0}$ [g/m ²]	0,65	0,5	0,1	0,3	0,35	0,4	0,5	0,2	0,1
$C_{\text{pen},1}$ [--]	3,2	1,4	1	1,8	2,8	2,5	9	3,6	3,5
$\Delta C_{\text{pen},1}$ [--]	0,3					0,7	1,5	0,4	0,2

Tabelle 2: Stricheigenschaften, Auftragung und Penetrationsparameter der 9 untersuchten Streichfarben aus Tabelle 1.

4.2 Immobilisierungspunkt der Streichfarbe

Die Streichfarbe ist vor der Auftragung auf das Rohpapier eine fließfähige Suspension. Wird aus dieser das Serum bis herunter zum Immobilisierungspunkt entzogen, tritt Verfestigung ein. Die erstarrte poröse Struktur kann bei einem weiteren Flüssigkeitsentzug nicht mehr schrumpfen. Ebenso wenig ist eine weitere Penetration durch kapillares Saugen aus dem Strich in das Rohpapier möglich, da die Poren des verfestigten Striches [Hei92] kleiner sind als die Poren im Papier [Rea94].

Für die Bestimmung des Immobilisierungspunktes entstanden einige klassische Messmethoden [ReU80]:

Bei der ersten Methode trägt man mit Hilfe eines Glasstabes eine dünne Schicht Streichfarbe auf eine unbehandelte Tonplatte auf. Wenn der Immobilisierungspunkt erreicht ist, löst sich die Strichschicht von der Tonplatte und bleibt am Glasstab kleben. Die Feuchte der so entstandenen Probe kann dann gravimetrisch bestimmt werden. Die Methode funktioniert i. a. zuverlässig, wird aber für Streichfarben mit viel Carbonat wegen der Brüchigkeit der Proben problematisch.

Die zweite klassische Methode erfolgt durch Druckfiltration der Streichfarbe durch feinporöse Membranen. Nach einer Verweilzeit von 20 bis 120 min wertet man den Wassergehalt des entstandenen Filterkuchen gravimetrisch aus. Obwohl diese Methode halbautomatisiert verlaufen kann und über eine hohe Zuverlässigkeit verfügt, ist sie nicht geeignet für eine schnelle Bewertung vor Ort.

Aus den oben beschriebenen Gründen wird das klassische Verfahren abgewandelt. Bei der neuen Methode wird auf eine Tonplatte

Streichfarbe im Überschuss aufgetragen. Die Schichtdicke beträgt hier mehrere Millimeter.

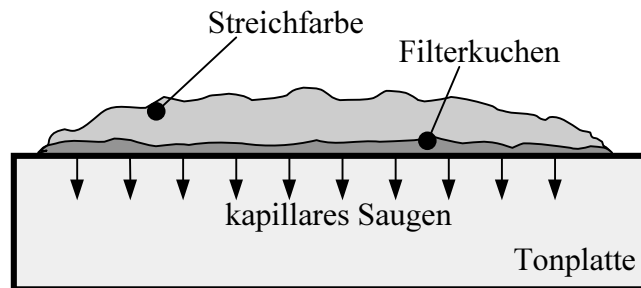


Abbildung 4.17: Prinzipskizze der neuen Messmethode für die Bestimmung des Immobilisierungspunktes. Auf eine Tonplatte wird Streichfarbe im Überschuss aufgetragen. Durch kapillares Saugen entsteht auf der Platte ein dicker Filterkuchen, der nach der Entfernung der flüssigen Schicht entnommen werden kann.

Während einer Wartezeit von 1-2 Minuten entzieht die Tonplatte durch kapillares Saugen Flüssigkeit aus der Streichfarbe. Auf der Oberfläche der Platte bildet sich infolge dessen ein Filterkuchen aus. Solange sich über dem Filterkuchen ein Vorrat an noch flüssiger Streichfarbe befindet, wird dieser von Serum durchgeströmt, so dass seine Feuchte stets am Immobilisierungspunkt gehalten wird.

Am Ende der Wartezeit wird die flüssig gebliebene obere Schicht vom Filterkuchen restlos entfernt. So kommt die immobilisierte Schicht zum Vorschein, deren Dicke bis zu 2 mm beträgt. Diese Schicht wird bei der Probenahme von der Tonplatte geschabt. Die Auswertung erfolgt auch hier gravimetrisch.

Mit dieser Methode können alle Streichfarben problemlos vermessen werden, auch diejenigen mit einem hohen Gehalt an Carbonat. Außerdem liefert die Methode eine gute Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse: Die Schwankungen betragen ± 0.75 % im Messbereich von 79 bis 86 % Feststoff.

4.3 Serum – Gewinnung und Viskositätsmessung

Die Streichfarbe ist eine Suspension, die aus Pigmenten und einer flüssigen Phase – dem Serum – besteht. Das Serum besteht hauptsächlich aus Wasser, mit einem geringem Massenanteilen an Bindemitteln und Additiven. Wegen der hohen Stabilität der Suspension kann die Abtrennung von Serum nur unter hohem Aufwand erfolgreich durchgeführt werden. So kann man das Serum z. B. in einer Ultrazentrifuge bei Beschleunigungen von bis zu 20000 G (Erdbeschleunigung) gewinnen, obwohl in Sonderfällen schon etwa 4000 G genügen. Die Verweilzeit in der Zentrifuge beträgt bis zu einer halben Stunde, nach deren Ablauf sich die Streichfarbe in Serum und Sediment auftrennt. Der Anteil an so gewonnenem Serum beträgt ca. 15-20 % des ursprünglichen Probenvolumens und kann mit einer Pipette abgesaugt werden. Das übrig bleibende Sediment ist der Form nach eine klebrige, feste Masse, die nur schwer aus den Zentrifugier-Küvetten entfernt werden kann.

Die Viskosität des Serums wurde mit einem SCHOTT-Kapillarviskosimeter gemessen. Die Proben werden dabei im Wärmebad temperiert. Während der Messungen muss man strengstens auf die Sauberkeit der Messkapillaren achten. Ansonsten besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Innenwände der Messkapillare durch einen organischen Film belegt werden. Der einmal gebildete Film lässt sich dann nur extrem schwer entfernen.

4.4 Vergleich der Trocknungskinetik unterschiedlicher Streichfarben

Bei der Entwicklung des Berechnungsmodells für die Trocknung gestrichener Papiere wurde angenommen, dass sich die Strichoberfläche mit fortschreitendem Feuchtigkeitsverlust allmählich gegenüber den Stofftransport verschließt (Gleichungen 109 bis 111). Weiterhin wurde angenommen, dass sich Streichfarben diesbezüglich immer auf die gleiche Weise verhalten, unabhängig von ihrer Zusammensetzung. In diesem Kapitel wird diese zweite Annahme in einer Trocknungskammer (Abbildung 4.18) experimentell untersucht.

Mit der beschriebenen Apparatur ist es möglich, die Massenänderung einer Probe während der Trocknung bei verschiedenen Umgebungstemperaturen zu messen.

Bei der Durchführung der Messungen werden die Proben auf gläsernen Objektträgern für die Mikroskopie präpariert. Somit kann das Wasser während der Trocknung des Strichs nur über die freie Oberfläche in die Gasphase entweichen. Zur Präparation werden aus 0.2 mm dicker Kunststofffolie 3 x 8 cm große Schablonen geschnitten, in die zwei kreisrunde Löcher mit einem Durchmesser von 20 mm gestanzt wurden. Die Schablone wird auf dem Objektträger plziert, dann auf den Rand der Folie eine kleine Menge der zu untersuchenden Streichfarbe aufgebracht. Mit einem Rakel wird die Probe über die runden Öffnungen abgezogen. Nach dem Abnehmen der Schablone erhält man zwei benachbarte, gleichmäßig dicke, kreisrunde Strichschichten.

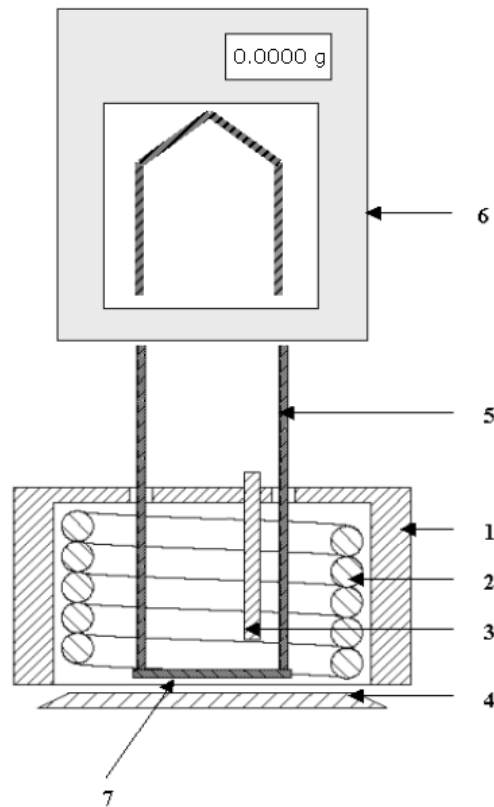


Abbildung 4.18: Messapparatur zur Messung der Massenabnahme von Strichproben. Die isolierte Messzelle **1** kann über eine Heizspirale **2** temperiert werden, die durch einen Thermostaten mit Warmwasser gespeist wird. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in der Messzelle werden über den Fühler **3** gemessen. Der Boden **4** der Messzelle kann zum Einbringen einer Probe geöffnet werden. Die Aufhängung **5** verbindet die Waage **6** mit dem Probenhalter **7**.

Vor der Probenpräparation wird die Masse des Objektträgers bestimmt. Nach dem Aufbringen der Streichfarbe wird die Probe auf dem Wägetisch in der Messzelle plziert. Die Messung wird nach dem Einpendeln der Waage gestartet. Während der gesamten Laufzeit werden die Masse der Probe sowie die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in der Messzelle aufgenommen. Zum Abschluss des Trocknungsversuchs wird die Dicke der erhaltenen Filme mit einer digitalen Bügelmessschraube auf 1 µm genau gemessen.

Der Feststoffgehalt der Streichfarben zu Beginn der Messung wurde nach einer modifizierten Form der DIN 53189, Verfahren C, bestimmt („Die Bestimmung des Festkörpergehalts von Dispersionen“): Danach soll $1 \pm 0,2$ g Probe in einer Aluminiumschale 30 Minuten in einem Wärmeschrank bei 105 ± 2 °C gelagert und danach 30 Minuten in einem Exsikkator abgekühlt werden. Die Streichfarben werden abweichend von der DIN-Norm wegen ihrer verschlossenen Oberfläche länger getrocknet. Sie werden 3 Stunden lang in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 105 ± 2 °C gelagert, danach 30 Minuten lang in einem Exsikkator abgekühlt. Die getrocknete Proben werden auf 0,0001 g genau gewogen. Der Feststoffgehalt FG in Gew.-% wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$FG = \frac{m_{dry} - m_{pan}}{m_{moist} - m_{pan}} \cdot 100 \quad (176)$$

Hierbei bedeutet m_{pan} die Masse der Aluminiumschale, m_{moist} die Masse der Schale mit der feuchten Probe und m_{dry} die Masse der Schale mit dem trockenen Rückstand.

Die Trocknungsversuche wurden bei einer Lufttemperatur von 45 °C durchgeführt. Die durchgeführten Messserien unterschieden sich in der Zusammensetzung der Streichfarben:

1. Gleiches Pigmentsystem und Verdicker, verschiedene SB-Latex-Binder,
2. gleiches Pigmentsystem, verschiedene Verdicker und Acrylester/Styrol-Latizes als Binder,
3. gleiches Pigmentsystem, verschiedene Anteile an Stärke und Latex als Binder,
4. gleiches Binder und Verdicker, verschiedene Carbonat/Clay-Pigmentsysteme,

5. unterschiedliche, beliebig ausgewählte Streichfarben aus Pilotversuchen und
6. unterschiedlicher Latexgehalt (5 bis 24 % Teile otro).

Der Verlauf der Trocknungskurven der Streichfarben wird am Beispiel der oben genannten 1. Serie (Farben F1 bis F5) in Abbildung 4.19 dargestellt. Den Feststoffgehalt der Probe als Funktion der Zeit erhält man nach Gleichung 4.4.1.

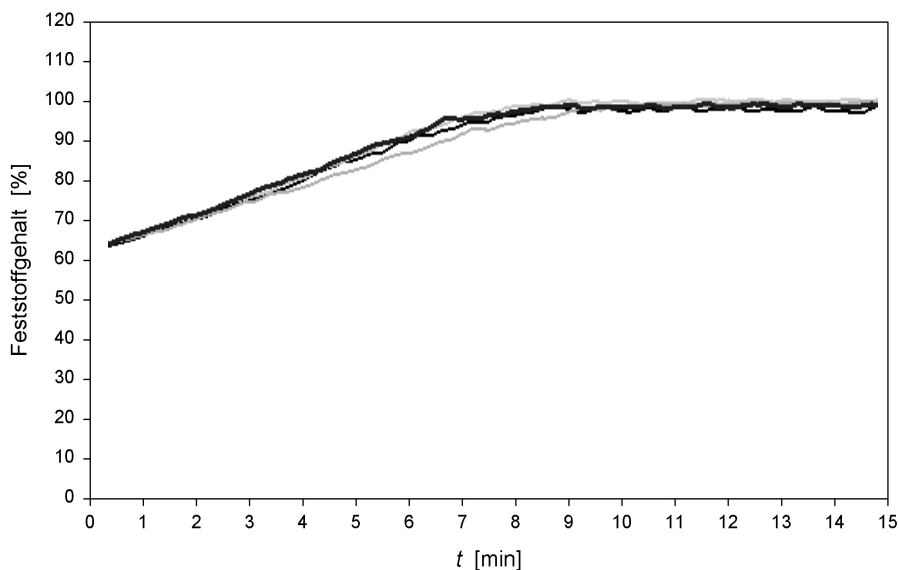


Abbildung 4.19: Austrocknung der Streichfarben F1, F2, F3 und F5: Die unterschiedlichen Streichfarbenrezepturen weisen die gleiche Trocknungskinetik auf.

Die Trocknungskinetik ist für alle Streichfarben ähnlich. Dies gilt auch für die Serien 2 bis 6. Die geringfügigen Abweichungen können auf Unzulänglichkeiten bei der Präparation der Proben bzw. der Messapparatur zurückgeführt werden.

Die Versuche bestätigen, dass die Kinetik der Trocknung der Streichfarben über die freie Oberfläche nicht entscheidend von ihrer Zusammensetzung abhängt. Dies gilt, soweit die Feststoffgehalte zum Versuchsbeginn gleich gehalten werden. Die praktische Bedeutung dieser Untersuchung liegt in der vereinfachten Modellierung: Die Verdunstung über die freie Oberfläche aller Streichfarben

kann auf gleiche Art und Weise beschrieben werden, wie in Abschnitt 3.2.5 angenommen.

4.5 Temperatur und Feuchte

Temperatur und Feuchte wurden während der Pilot- und Betriebsversuche an Streichmaschinen mit drei spezifischen Messgeräten erfasst:

- Die Bahntemperatur wurde mit einem handgeführten IR-Pyrometer gemessen (Raytek Raynger, maximaler Messfehler: $\pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Mit diesem Verfahren kann die Oberflächentemperatur eines Objekts gemessen werden. Bei den dünnen Papiersorten, die in dieser Arbeit untersucht werden, kann allerdings die Oberflächentemperatur näherungsweise der mittleren Bahntemperatur gleich gesetzt werden (siehe Abschnitt 3).
- Die Temperatur- und die Feuchtigkeitsmessung der Umgebungsluft erfolgten mit einem Transpirationspsychrometer (Ultrakust Hygrophil).
- Die Messung der Lufttemperatur in und nach einem IR-Trockner wurde mit der Sonde eines Kontaktthermometers durchgeführt (Ultrakust Thermophil).

5 Experimentelle Erfassung und Simulation von Streichmaschinen

Zur Überprüfung der Funktions- und Aussagefähigkeit der Simulation wurden Experimente an Streichmaschinen durchgeführt. Der Verlauf der Bahntemperatur entlang der Maschine sowie die Endfeuchte der gestrichenen Papierbahn wurden für mehrere Testfälle berechnet und mit den Messwerten verglichen.

Die Simulation von Streichmaschinen basiert auf dem in Kapitel 3 dargestellten theoretischen Modellsystem. Die Berechnung ist modular aufgebaut: Die funktionalen Abschnitte der Maschine werden nacheinander in Laufrichtung der Bahn spezifiziert und berechnet. Für jede Trocknungsart werden bezüglich Wärme- und Stofftransport Randbedingungen vorgegeben. In der Simulation unterscheidet man die Module freier Zug, IR-Trockner und Konvektionstrockner. Dabei können die beiden Seiten der gestrichenen Papierbahn unterschiedlichen Randbedingungen unterliegen. Diese werden durch die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Umgebungsluft, die Charakteristika des Wärmeübergangs im Trocknungsmodul und die von der Papierbahn absorbierte Strahlung beschrieben. Die relative Luftfeuchtigkeit in den Lufttrocknern wird dabei wegen hohen Temperaturen und niedriger Sättigung als Null angenommen.

Die für die Simulation notwendigen Vorgaben in Form von Prozess- und Materialparametern können wie folgt aufgeführt werden:

- Bahngeschwindigkeit V_p
- Rohpapier:
 - Flächengewicht m_p ,
 - Dicke L_p ,
 - Porosität ε (Hohlraumanteil),

- Temperatur und Feuchte vor dem Coater T_P , X_P ,
- Zellstoffanteil m_{cell} .
- Strich:
 - Temperatur und Feststoffgehalt der Streichfarbe T_C , X_C ,
 - Strichgewicht m_C ,
 - Immobilisierungspunkt X_{immo} ,
 - Penetrationsverhalten.

5.1 Validierungsversuche an Pilotmaschinen

Die Validierung des Berechnungsmodells wurde in erster Linie aufgrund Daten aus Experimenten an folgenden Versuchsanlagen durchgeführt:

- BGV Coating Pilot Plant, CTP Grenoble,
- VESTRA, München,
- VSM1 und 2, Voith Paper Heidenheim,
- BASF AG, Ludwigshafen.

Als Beispiel einer Versuchsstrechanlage zeigt Abbildung 5.1 eine Skizze der VSM2 (Voith Paper). In der VSM2 durchläuft das Papier zunächst einen Blade Coater (Strichauftragung). Das erste aktive Trocknungsmodul ist ein kurzer gasbeheizter IR-Trockner mit jeweils 2 Reihen von Strahlern pro Papierseite. Der darauf folgende Konvektionstrockner besteht aus jeweils einem beheizten Airturn an seinem Anfang bzw. Ende und einem HPC-Modul in der Mitte. Im Anschluss an den Lufttrockner befindet sich ein langer Freilauf bis zur Aufrollung.

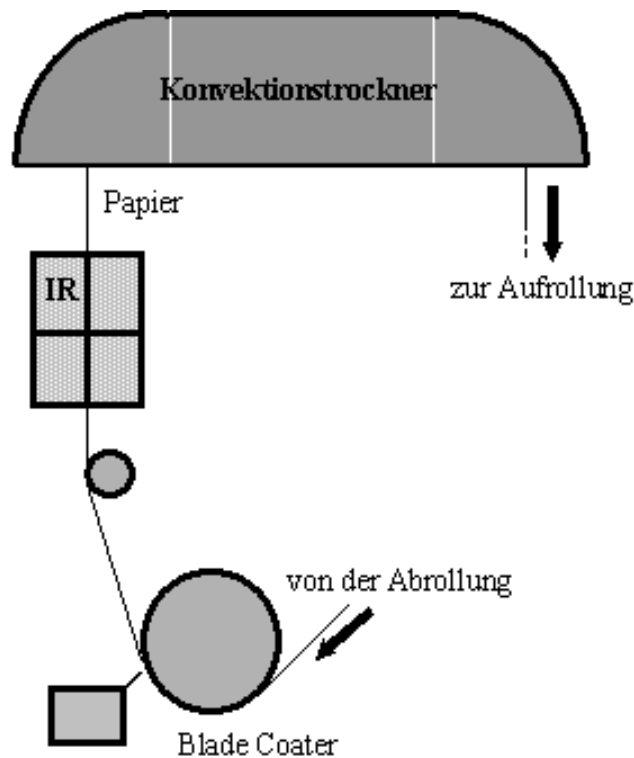


Abbildung 5.1: Skizze der VSM2 (Voith Paper, Heidenheim)

Während der Versuche wurden folgende Betriebsparameter aus dem Prozessleitsystem der Pilotmaschine entnommen:

- Bahngeschwindigkeit,
- Flächengewicht und Feuchte des Rohpapiers,
- Strichgewicht,
- Bahnfeuchte an der Aufrollung,
- Lufttemperatur im Konvektionstrockner,
- Leistung des IR-Trockners.

Weiterhin wurden einige Größen manuell ermittelt:

- Aschegehalt des Rohpapiers (Einäscherung),
- Porosität des Rohpapiers (Tränken der Proben mit Öl),
- Feststoffgehalt, Temperatur und Immobilisierungspunkt (Abschnitt 4.2) der Streichfarbe,

- Penetrationsverhalten des Striches (Abschnitt 4.1),
- Bahntemperaturen entlang der Maschine (Abschnitt 4.5),
- Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft an ausgewählten Stellen in der Maschine (Abschnitt 4.5).

Die Validierungsversuche wurden so gestaltet, dass man dadurch alle wesentlichen Betriebsmodi der Streichmaschine erfassen konnte. Dazu wurden die Betriebsparameter in folgender Weise variiert:

- Rohpapier: mehrere Sorten (holzhaltig und holzfrei), 47-80 g/m²,
- Streichfarbe: unterschiedliche Sorten auf Karbonat- und Karbonat-Kaolin-Basis, mit Latex-CMC und Latex-Stärke als Binder-system,
- Strich: 6 bis 14 g/m² als Einzelstrich,
- Bahngeschwindigkeit: 600 bis 2000 m/min,
- Lufttemperatur im Konvektionstrockner: 80 bis 350 °C,
- Trocknungsstrategie:
 - reine Lufttrocknung,
 - kombinierte Luft- und IR-Trocknung,
 - reine IR-Trocknung.

5.2 Versuche an Produktionsmaschinen

Das in Kapitel 3 beschriebene Modellsystem muss sowohl Pilot- als auch Produktionsmaschinen berechnen können. Daher wurden an den Full-Scale-Maschinen Kaukas OMC1 und Perlen PM4 während des Produktionsbetriebs Messungen durchgeführt. Die Skizzen der erfassten Maschinen findet man im Abschnitt 5.5.

Bei Messungen an Produktionsanlagen darf der laufende Betrieb nicht beeinträchtigt werden. So unterliegen die Möglichkeiten zur Variation der Betriebsparameter im Vergleich zu den Pilotversuchen starken Einschränkungen. Der Betriebspunkt kann in der Regel nur in engen Grenzen verändert werden. Die Lufttemperatur in den Konvektionstrocknern kann zwar variiert werden, die Endfeuchte der Papierbahn muss dabei jedoch weitgehend konstant bleiben. Die Bahngeschwindigkeit darf aus Produktivitätsgründen nur geringfügig von der Höchstgeschwindigkeit der Maschine abweichen. Das Strichgewicht und die Trocknungsstrategie dürfen für Versuchszwecke nicht verändert werden, ebenso wenig wie die Bahngeschwindigkeit bei Online-Streichmaschinen. Statt einer aktiven Änderung des Betriebspunktes für die Erfassung des Verhaltens einer Streichmaschine kann man in manchen Fällen auf die Eigendynamik der Anlage zurückgreifen. Sowohl der Anfahrvorgang der Maschine als auch Schwankungen des Betriebspunktes verursachen instationäre Produktionsbedingungen. Diese können günstige Bedingungen für Messungen schaffen.

Die Produktionsmaschinen sind im Allgemeinen stark verbaut und daher für Messungen nur schwer zugänglich. So gestaltet sich die Erfassung der Messwerte für die Simulation schwieriger als bei Pilotversuchen:

- Die Bahntemperatur kann nicht an allen beliebigen Punkten in der Maschine gemessen werden.
- Die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Umgebungsluft kann oft nur am Bahnrand gemessen werden. Die Werte, die in der Bahnmitte herrschen, können davon stark abweichen.
- Die Erfassung der Penetration mit der Soft-Scrape-Methode geht mit einer Beschädigung des Strichs einher. Deshalb kann die Messung nur am Bahnrand (Beschnitt) durchgeführt wer-

den. Die Penetration am Rand ist jedoch nicht unbedingt repräsentativ für die gesamte Bahnbreite.

- Papierproben für die Untersuchung von Aschegehalt und Porosität können nur bei Bahnabriss entnommen werden.

5.3 Struktur der Simulation

Das in Kapitel 3 beschriebene Modellsystem wurde in einem Simulationsprogramm zur Berechnung der Trocknung in realen Streichanlagen umgesetzt. In der Rechenvorschrift werden vor der eigentlichen Berechnung die Maschinendaten und Materialeigenschaften festgelegt. Die Streichmaschine wird als eine Abfolge von Sequenzen definiert, die rechnerisch nacheinander durchlaufen werden. Eine Sequenz wird durch folgende Parameter charakterisiert:

- Länge der Sequenz,
- Hydraulischer Durchmesser D_h der Sequenz, falls sie eine kanalähnliche Geometrie aufweist,
- Art der konvektiven Randbedingung:
 - keine Konvektion,
 - freier Zug (Koeffizienten der Gleichung 38),
 - Kanalströmung (Koeffizienten der Gleichung 39),
 - erzwungene Konvektion (Koeffizienten der Gleichungen 45 bzw. 48),
- Lufttemperatur T_{air} ,
- Relative Feuchte der Umgebungsluft φ ,
- Temperatur T_{IR} und Emissionskoeffizient ε_{IR} des evtl. vorhandenen IR-Strahlers,
- Wirkungsgrad η_{IR} der IR-Absorption der gestrichenen Papierbahn.

Dazu kommt noch die Bahngeschwindigkeit W . Nachdem die Geometrie und die Randbedingungen der zu berechnenden Streichmaschine definiert wurden, werden die Anfangsbedingungen festgelegt. Unter diesen versteht man den Zustand von Papier und Strich am Eingang der Maschine (Coater):

- Temperatur von Rohpapier T_{p0} und Streichfarbe T_{c0} ,
- Anfangsfeuchte des Rohpapiers X_{p0} und Feststoffgehalt der Streichfarbe FG_{C0} ,
- Penetration nach dem Coater $m_{pen,0}$,
- Penetrationskonstante $C_{pen,1}$ (siehe Gleichung 99),
- Penetrationstiefe L_{pen} (siehe Abbildung 3.10).

Für die Durchführung der Berechnung müssen außerdem folgende Materialeigenschaften definiert werden:

- Aschegehalt des Rohpapiers,
- Porosität von Strich und Rohpapier,
- Flächengewicht von Strich und Rohpapier,
- Dicke von Strich und Rohpapier,
- Sorptionsisotherme und Sorptionskinetik des Rohpapiers,
- Spezifische Wärmekapazitäten der Komponenten von Strich und Rohpapier (Fasern, Füllstoff, Pigmente, Wasser),
- Immobilisierungspunkt der Streichfarbe,
- Emissionskoeffiziente für die IR-Strahlung.

Die eigentliche Simulation der Trocknung von gestrichenem Papier fängt mit der Berechnung einiger Startwerte für die Stoffparameter von Strich und Rohpapier an:

- Anfangsfeuchte des Striches X_C ,

$$X_C = X_{C,0} - \frac{m_{pen,0}}{m_{C,dry}} \quad (177),$$

der sich durch die Penetration im Coater $m_{pen,0}$ gegenüber dem Feuchtegehalt $X_{C,0}$ der Streichfarbe verringert,

- Anfangsfeuchte der Penetrationszone X_{mP} (siehe Abbildung 3.1),

$$X_{mP} = X_{mP,0} + \frac{m_{pen,0}}{m_{mP,dry}} \quad (178),$$

der sich durch die Penetration im Coater $m_{pen,0}$ erhöht,

- Spezifische Wärmekapazität $c_{P,i}$ der i -ten Zonen (Abbildung 3.1) nach dem Mischungsansatz

$$c_{P,i} = \sum_{j=1}^K \frac{m_{j,i}}{m_i} c_{P,j} \quad (179)$$

in einem System mit K Komponenten,

- Temperaturänderung der Bahn im Coater (Gleichungen 23 und 24).

Nach der Berechnung der Startwerte wird die Trocknung in den Modulen der Streichmaschine sukzessive simuliert. Die einzelnen Module erhalten eine Ortsdiskretisierung, die mit $dL = Wdt$ vom Zeitschritt dt und von der Bahngeschwindigkeit W abhängt. Für jeden Ortsschritt werden dabei folgende Berechnungen durchgeführt:

- Stoffwerte der Luft: Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität (Gleichungen 159 bis 162),
- Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in der Umgebungsluft (Gleichung 165),

- Nu-Zahl für die konvektive Wärmeübertragung (Gleichungen 38, 39 und 45 bzw. 48),
- Wärmeübergangskoeffizienten α (aufgrund Gleichung 30),
- IR-Wärmestromdichte (Gleichungen 61 und 62),
- Kontakt-Wärmestromdichte (Gleichung 63),
- Partialdruck vom Wasserdampf in den drei Zonen (Abbildung 3.1, Gleichungen 163, 167, 169 und 173),
- Treibende Kraft des Stofftransports durch Diffusion für alle Stoffströme vom Wasserdampf (Abbildung 3.14, Faktor B aus Gleichung 128),
- Wegen der Wechselwirkung zwischen Wärme- und Stofftransport modifizierte modifizierte Wärmeübertragungskoeffizienten (Gleichung 158),
- Stoffübertragungskoeffizienten aufgrund der Analogie zwischen Wärme- und Stofftransport als Basiswert (Gleichung 106),
- Wegen der Wechselwirkung zwischen Wärme- und Stofftransport modifizierte Stoffübertragungskoeffizienten, (Gleichung 158),
- Modifikation der Verdunstung wegen dem Verschließen der Strichoberfläche (Gleichungen 110 und 111),
- Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft (Gleichung 165),
- Einbeziehung der Diffusionswiderstände bei dem Dampftransport durch poröse Medien in die Koeffizienten des Stofftransports für alle Diffusionsströme (Abbildung 3.14, Gleichung 117),
- Massenströme durch Verdunstung (Abbildung 3.14, Gleichung 128),
- Massenstrom durch Penetration (Gleichung 100),
- Änderung der Feuchtigkeit in der einzelnen Zonen des gestrichenen Papiers (Abbildung 3.1, Euler-diskretisierte Formen der Gleichungen 70 bis 72),

- Momentane spezifische Wärmekapazität der einzelnen Zonen des gestrichenen Papiers (Gleichung 179),
- Verdampfungsenthalpie des Wassers (Gleichung 164),
- Sorptionsenthalpie des Rohpapiers (Gleichung 172),
- Wärmeströme der Phasenumwandlung (Gleichungen 21 und 22),
- Erhöhung der Bahntemperatur während eines Zeitschrittes (Gleichung 20),
- Momentane Feuchte und Temperatur der gestrichenen Bahn.

Führt man die oben beschriebene Prozedur für jeden Zeitschritt (entsprechend der Lauflänge der Streichmaschine) durch, so ergibt sich daraus der Verlauf der Feuchte und Bahntemperatur.

5.4 Simulation von Pilotstreichmaschinen

5.4.1 Versuchsstreichmaschine VSM2 – Einzelstrich einseitig

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulation am Beispiel der Versuchsstreichmaschine VSM2 dargestellt. Dabei wird der folgende Satz von experimentell gewonnenen Systemparametern verwendet:

- Coater: JetFlow F,
- Bahngeschwindigkeit: 1400 m/min,
- Streichfarbe:
 - 70 Teile Carbonat,
 - 30 Teile Kaolin,
 - 12 Teile SB Latex,
 - 0.4 Teile CMC,
- Strichgewicht: 12 g/m² als Einzelstrich,

- Rohpapier: 47 g/m² holzhaltig,
- Lufttemperatur im Konvektionstrockner: 200 °C,
- IR-Trockner: einseitige Bestrahlung,
- Umgebungsluft: 25 bis 30 °C, 50 % relative Feuchtigkeit,
- Streichfarbe:
 - Feststoffgehalt: 65.5 %,
 - Temperatur: 28 °C,
 - Immobilisierung: 82 %,
- Penetration: 0.3 g/m² nach dem Blade, Konstante $C_{pen} = 1.8$,
- Rohpapier: Asche 10 %, Feuchte 3 %, Temperatur 25 °C,
- Wärmeübertragung im Lufttrockner: $\alpha = 220 \text{ W/m}^2/\text{K}$,
- IR-Leistung: $P_{IR} = 30 \text{ W/m/Reihe}$.

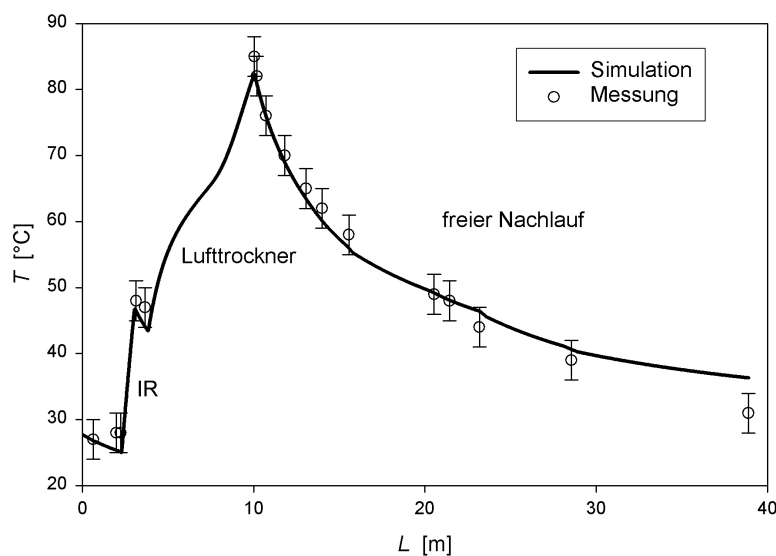


Abbildung 5.2: Verlauf der gemessenen und simulierten Bahntemperaturen entlang der Versuchsanlage VSM2 – ein Validierungsfall. Die Fehlerbalken entstammen der Genauigkeit der angewendeten Messtechnik (Abschnitt 4.5).

Bei dieser Abbildung handelt es sich um den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Bahntemperaturen entlang der Streichmaschine. Die Messungen werden dabei von der berechneten Temperaturkurve sehr gut wiedergegeben. Die eingezeichnete Temperaturkurve besteht aus mehreren, für die VSM2 charakteristi-

schen Abschnitten. Die Berechnung fängt unmittelbar nach dem Coater an. Die Bahn, die etwas wärmer ist als die Umgebungsluft, erfährt eine leichte Abkühlung im ersten freien Zug, der zum IR-Trockner führt. Dort wird die Bahn infolge der hohen Strahlungsdichte schnell aufgewärmt. Die Bahntemperatur steigt hier steil an. Darauf folgt eine kurze Abkühlungsphase im freien Zug zwischen dem IR- und dem Konvektionstrockner. Im Lufttrockner wird die Papierbahn intensiv getrocknet, wobei die Bahntemperatur stark ansteigt. Nach dem Heißlufttrockner kühlt sich die Bahn im freien Nachlauf der Maschine unter Umgebungsbedingungen allmählich ab. Sowohl die Berechnung als auch die Trocknung enden an der Aufrollung. Der hier dargestellte Verlauf ist, bezogen auf die Struktur der Abschnitte und die Genauigkeit der Simulation, bezeichnend für alle Validierungsversuche an der VSM2. Die maximale Abweichung der lokalen Bahntemperaturen liegt im Bereich von $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die Simulation berechnet auch die Endfeuchte der gestrichenen Bahn mit hoher Genauigkeit: Der gemessene Wert beträgt 4.7 %, der simulierte 4.6 %. Die Kurve der Bahnfeuchte (Abbildung 5.3) durchläuft erst einen flach abfallenden Bereich in den freien Zügen und im IR-Abschnitt, da diese Maschinensegmente lediglich eine geringe Trocknungsrate aufweisen. Die Trocknung wird im Lufttrockner stark intensiviert, so dass die Bahnfeuchte dort stark reduziert wird. Im darauf folgenden freien Zug kommt es dann zu einer schwachen Nachtrocknung, solange die Bahn noch heiß ist. Am Ende der Laufstrecke steigt die Bahnfeuchte wieder leicht an. Dies ist eine Folge der Sorption der Luftfeuchtigkeit seitens der abgekühlten und sehr trockenen Bahn.

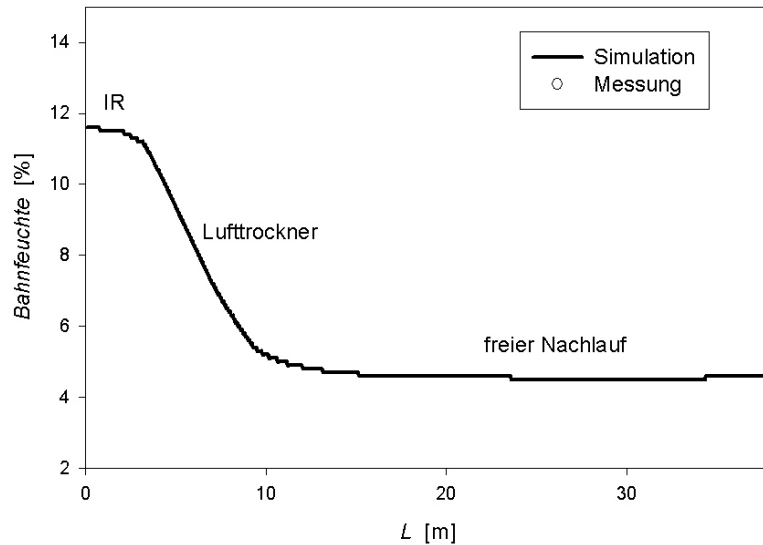


Abbildung 5.3: Verlauf der simulierten Bahnfeuchte entlang der Versuchsanlage VSM2 – ein Validierungsfall: Der gemessene Wert der Endfeuchte beträgt 4.7 %, der simulierte 4.6 %.

5.4.1 Versuchsstreichmaschine VSM1 – Einzelstrich doppelseitig

Neben dem einseitig aufgetragenen Einzelstrich wird auch der simultan aufgetragene, beidseitige Einzelstrich in der Produktion häufig angewandt. Das Modell eines so gestrichenen Papiers besteht aus sechs Stofftransport-Zonen (Abbildung 5.4). Diese sind der ober- und unterseitige Strich, die zugehörigen durch Penetration befeuchteten Bereiche des Rohpapiers und der Kernbereich aus trockenem Rohpapier, geteilt durch die Symmetrieebene. Alle Bereiche bis auf die beiden Zonen des trockenen Rohpapiers weisen unterschiedliche Feuchtigkeitsniveaus auf. Da sich in der Regel auf den beiden Seiten des Rohpapiers die gleiche Strichmenge befindet, kann dieses System als symmetrisch angenommen werden. Die Symmetrieebene verläuft parallel zur Oberfläche und teilt die Papierbahn in zwei Gebiete gleicher Dicke. Aus der Symmetriebedingung folgt, dass über diese Mittelebene kein Stofftransport bestehen kann. Weiterhin gilt die Annahme (Kapitel 3), dass über die Dicke

des gestrichenen Papiers keine Gradienten der Temperatur auftreten können.

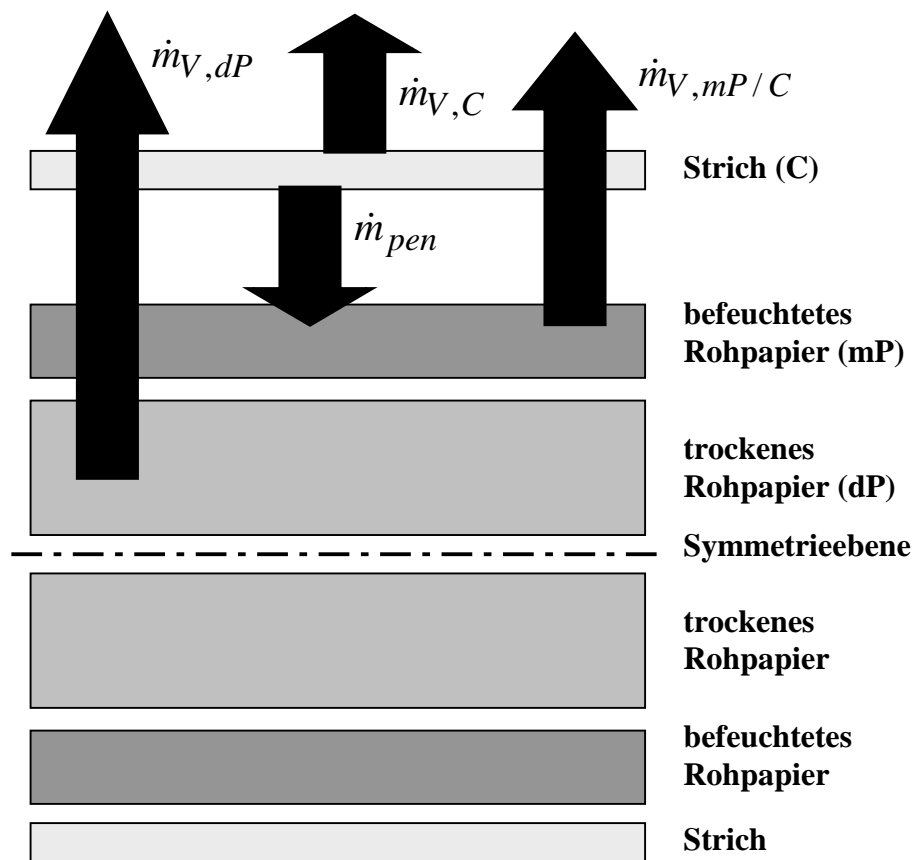


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung von Stofftransport im doppelseitig gestrichenen Papier

Wegen dieser neuen Bedingungen muss in Abschnitt 3.3 aufgestellte Massenbilanz neu überarbeitet werden. Die Bedingungen bezüglich der Wärmeübertragung ändern sich nicht. Die Bilanzierung des Stofftransports wird dabei nicht für jede materielle Zone durchgeführt. Durch die Nutzung der Symmetriebedingung muss die Berechnung nur für eine Hälfte der gestrichenen Bahn durchgeführt werden. Die modellierten Massenströme werden in der unten stehenden Abbildung dargestellt.

Die Mechanismen des Massentransports sind die Penetration und die Verdunstung. Der Verdunstungsstrom aus dem Strich vollzieht

sich direkt über die freie Oberfläche ($\dot{m}_{V,C}$). Durch Penetration \dot{m}_{pen} gelangt Flüssigkeit aus dem Strich in die Oberflächenschicht des Rohpapiers. Von hier aus verdunstet das Wasser durch die Strichschicht hindurch ($\dot{m}_{V,mP/C}$) in die Umgebungsluft. Das gleiche geschieht mit der Feuchtigkeit im trockenen Kernbereich ($\dot{m}_{V,dP/C}$). Die Modellbildung der einzelnen Massenströme wird im Abschnitt 3.3 beschrieben.

Für die Validierung des oben beschriebenen Modellsystems wurden Experimente an der Versuchsanlage VSM1 durchgeführt. Dabei wurde mit der gleichen Streichfarbe und dem gleichen Rohpapier gearbeitet wie im Abschnitt 5.4.1.

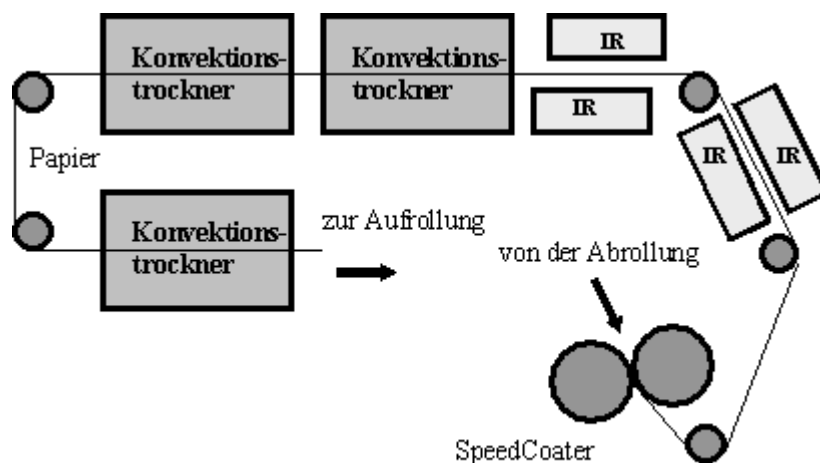


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Versuchsanlage VSM1 in Heidenheim

Die Trocknungssimulation des beidseitigen Striches in der VSM1 erfolgt an einem Fallbeispiel mit den folgenden Parametern:

- Coater: Speed Coater (Filmpresse),
- Bahngeschwindigkeit: 1200 m/min,
- Strichgewicht: jeweils 8 g/m² pro Seite,
- Lufttemperatur in den Konvektionstrocknern: 175-200 °C,
- 1. IR-Trockner: jew. 3 Reihen pro Papierseite eingeschaltet,

- 2. IR-Trockner: jew. 2 Reihen pro Papierseite eingeschaltet,
- Umgebungsluft: 20 bis 30 °C, 50 % relative Feuchtigkeit.

Die in der Simulation benötigten Systemparameter lauten dabei:

- Streichfarbe: - Feststoffgehalt: 63 %,
- Temperatur: 27 °C,
- Wärmeübertragung im Lufttrockner: $\alpha = 220 \text{ W/m}^2/\text{K}$,
- IR-Leistung: $P_{IR} = 23 \text{ W/m/Reihe}$.

In der folgenden Abbildung sind die in der VSM1 gemessenen und die berechneten Bahntemperaturen dargestellt.

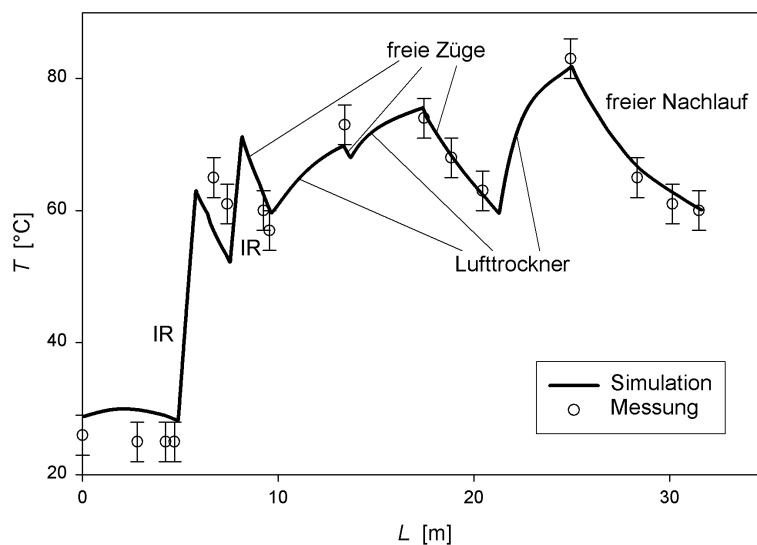


Abbildung 5.6: Verlauf der gemessenen und simulierten Bahntemperaturen entlang der Versuchsanlage VSM1 – ein Validierungsfall. Die Fehlerbalken entstammen der Genauigkeit der angewendeten Messtechnik (Abschnitt 4.5).

Die berechnete Temperaturkurve ist wegen der Geometrie der VSM1 (Abbildungen 5.5 und 5.6) komplexer als der in Abbildung 5.2 dargestellte Verlauf der VSM2 (Abbildung 5.1). Die Simulation zeigt aber auch hier eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die maximale Abweichung zwischen der gemessenen Temperatur und

der Simulation liegt im Bereich von ± 5 °C. Die gemessene Endfeuchte von 4.3 % wird mit 4.0 % ausreichend genau berechnet.

Die in der obigen Abbildung dargestellte Temperaturkurve ist charakteristisch für die VSM1. Die Berechnung fängt, wie bei der VSM2 auch, unmittelbar nach dem Coater an (Abbildung 5.6). Die Bahntemperatur nach dem Coater steigt für den gegebenen Praxisfall etwas an. Der durch die Penetration freigesetzte Sorptionswärmestrom liegt in diesem Bereich höher als die Kühlleistung des freien Zuges. Nach dem Umkehr dieser Bilanz und Erreichen eines Maximums kühlt die Bahn dann leicht ab. Anschließend wird die Bahn im IR-Trockner rasch aufgewärmt. Nach einer Abkühlung im Nachlauf des ersten IR-Trockners (freier Zug) tritt die Bahn in das zweite IR-Modul ein, mit dem gleichen Effekt wie beim ersten. Hinter den IR-Trocknern durchläuft die gestrichene Papierbahn drei Konvektionstrockner, die die Bahntemperatur ansteigen lassen. Zwischen den Lufttrocknern befinden sich freie Züge, die einen Abkühl-Effekt verursachen. Dabei ist der Abstand und dementsprechend die Abkühlung zwischen den ersten beiden Trocknern wesentlich kleiner als zwischen dem zweiten und dritten. Nach dem dritten Lufttrockner sinkt die Bahntemperatur im freien Nachlauf.

5.5 Simulation von Produktionsmaschinen

5.5.1 Kaukas OMC1 – Vorstrich

An der Streichanlage KAUKAS OMC1 (Off Machine Coater) wurden zwecks Erfassung der Trocknungscharakteristik Messungen bei laufender Produktion durchgeführt. Dies ermöglicht eine trocknungstechnische Simulation der Maschine und eine weitere Überprüfung des eigens entwickelten Modellsystems unter Produk-

tionsbedingungen. Die Geometrie der vermessenen Produktionsanlage ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Der beidseitige Vorstrich wird mit einer Filmpresse (Speed Coater) aufgetragen. Das darauf folgende IR-Modul dient zur schnellen Aufwärmung der Bahn. Die eigentliche Trocknungsaufgabe wird vom Konvektionstrockner (Lufttrockner) übernommen, der ähnlich aufgebaut ist, wie der Module Dryer im VSM2 (Abbildung 5.1). Die Maschine enthält keine Trocknungszyylinder. Die Stabilisierung der Bahn wird durch die S-Gruppe realisiert.

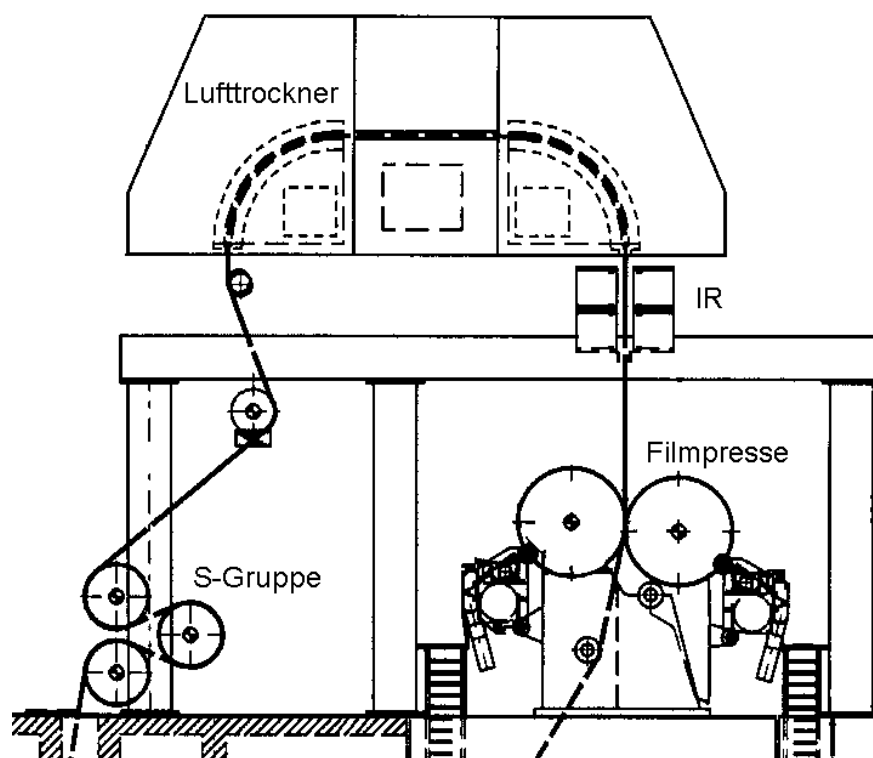


Abbildung 5.7: Geometrie des Vorstrich-Bereichs der Produktionsmaschine Kaukas OMC 1

Die Ergebnisse der Simulation werden an einem Beispiel (stationäre Produktion einer 80 g/m^2 -Sorte) mit den folgenden Betriebsparametern untersucht:

- Coater: Speed Coater,
- Bahngeschwindigkeit: 1300 m/min ,
- Flächengewicht Rohpapier: 44.3 g/m^2 otro, holzhaltig,

- Strichgewicht: $2 \times 7.5 \text{ g/m}^2$,
- Trocknungsluft im Konvektionstrockner: 250 bis 260 °C,
- IR-Leistung: 2×2 Reihen mit jeweils $30 \text{ kW/(m} \cdot \text{Reihe)}$,
- Bahnfeuchte vor Coater: 4.15 %,
- Bahntemperatur vor Coater: 36 °C,
- Endfeuchte: 6.8%.

Folgende Materialeigenschaften spielen bei der Simulation eine wichtige Rolle:

- Asche im Rohpapier: 10 %,
- Dicke des Rohpapiers: $60 \text{ }\mu\text{m}$,
- Feststoffgehalt der Streichfarbe: 63.8 %,
- Temperatur der Streichfarbe: 44 °C,
- Immobilisierungspunkt der Streichfarbe: 80 % Feststoff.

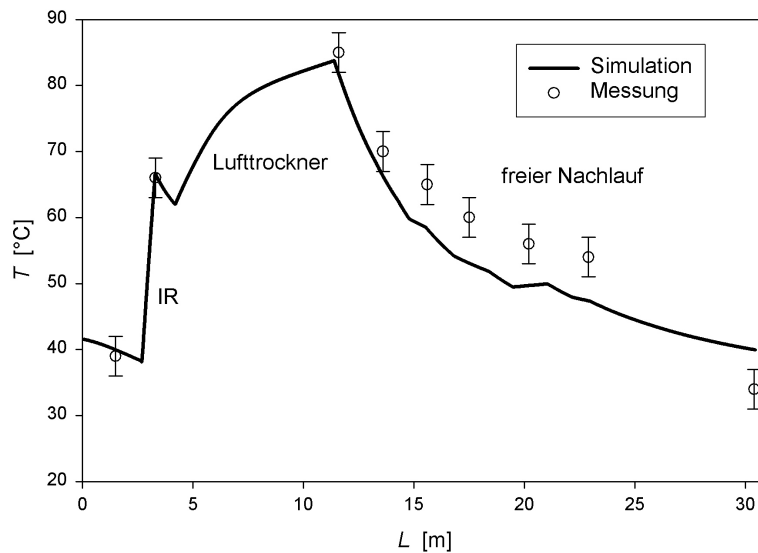


Abbildung 5.8: Verlauf der Bahntemperatur für die Trocknung vom Vorstrich beim stationären Produktionsbetrieb einer 80 g/m^2 -Sorte an der Kaukas OMC1. Die Fehlerbalken entstammen der Genauigkeit der angewendeten Messtechnik (Abschnitt 4.5).

Der Wert einiger Parameter in der Simulation muss durch Schätzung angenommen werden. So kann die Penetration wegen Unzu-

gänglichkeit der Bahn nach dem Coater nicht gemessen werden. Daher wird sie mit den für LWC-Papiere üblichen Werten $m_{pen,0} = 0.5 \text{ g/m}^2$ für die Entwässerung nach dem Coater und dem Exponenten $C_{pen,1} = 3$ (Gleichung 97) parametrisiert. Die Wärmeübertragung im Lufttrockner wird als Anpassungskonstante für den Temperaturverlauf und die Endfeuchte auf $\alpha = 150 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ gesetzt.

Die mit den obigen Parametern durchgeführte Berechnung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und simulierten Endfeuchte (6.8 % gegenüber 6.6 %). Der Verlauf der Bahntemperatur (Abbildung 5.8) ist wegen dem ähnlichen Aufbau der beiden Maschinen der Form nach gleich dem bei der Versuchsanlage VSM2 (Abschnitt 5.4.1).

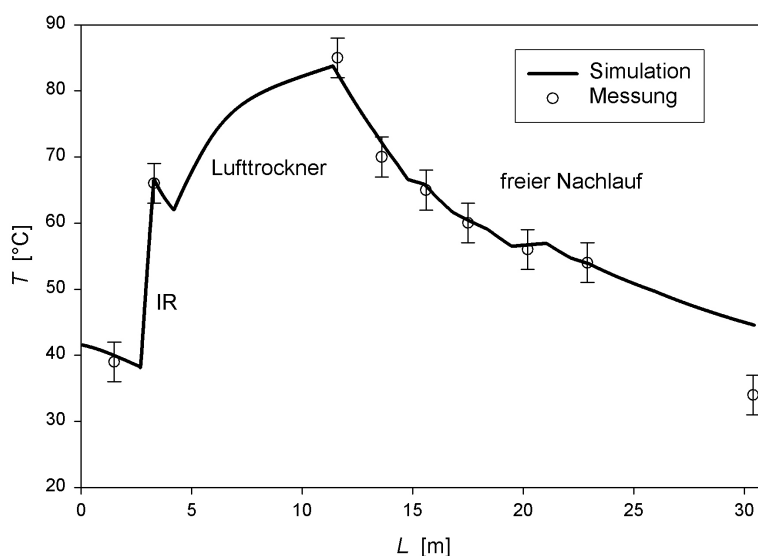


Abbildung 5.9: Verlauf der Bahntemperatur für die Trocknung vom Vorstrich beim stationären Produktionsbetrieb nach der Einführung des Korrekturfaktors 0.5 für die Wärmeübertragung im Nachlauf (80 g/m²-Sorte, Kaukas OMC1). Die Fehlerbalken entstammen der Genauigkeit der angewendeten Messtechnik (Abschnitt 4.5).

Die Simulation gibt die Entwicklung der Bahntemperatur in der Maschine sehr gut wieder. Allerdings kommt es zu größeren Abweichungen im freien Nachlauf nach dem Lufttrockner. Dies liegt an

der ungenauen Modellierung der Wärme- und Stoffübertragung für dieses Trocknungssegment. Der Nachlauf wird in der Berechnung als stückweise parallel angeströmte ebene Fläche abgebildet. Diese Modellvorstellung kann freie Abschnitte von Produktionsanlagen, die mit vielen Leitwalzen bestückt sind, nicht genau wiedergeben.

Setzt man für den Wärmetransport im Nachlauf den Korrekturfaktor $C_{geo} = 0.5$ (Gleichung 38) ein, so kann das Ergebnis der Simulation sehr gut an die Messwerte angepasst werden (Abbildung 5.9). Zugleich erhält man auch eine leichte Verbesserung der berechneten Endfeuchte auf 6.7 %.

5.5.2 Perlen PM4 – Einzelstrich

Eine zweite Produktionsanlage, deren Trocknungssegment vermessen wurde ist Perlen PM4. Es handelt sich dabei um eine Online-Streichmaschine: Sie befindet sich direkt im Anschluss an eine Papiermaschine, ohne dass das Rohpapier eine Umrollung als Zwischenschritt erfährt. Der Coater ist, ähnlich wie bei Kaukas OMC1, eine Filmpresse (Speed Coater) für doppelseitigen Einzelstrich. Die beiden Maschinen haben jedoch unterschiedliche Konzepte der Trocknung: Perlen PM4 kommt ohne IR-Trockner aus. Nach der Strichauftragung und einer kontaktlosen Umlenkung durch einen Airturn folgt unmittelbar der Konvektionstrockner. Die Stabilisierung der Bahn erfolgt durch den kurzen Zylinderabschnitt am Schluss der Maschine, der aus drei Zylindern besteht. Von diesen werden jedoch nur zwei schwach beheizt. Der Zylinderabschnitt wird hier wegen seinem geringen Einfluss auf die Trocknung nicht behandelt.

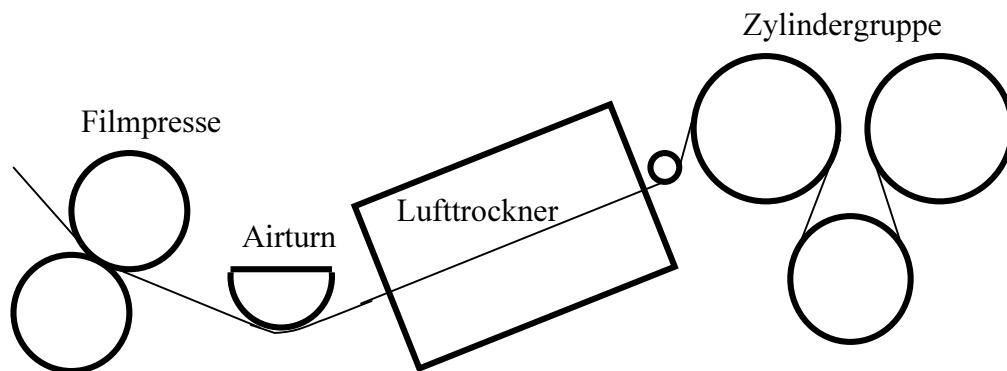


Abbildung 5.10: Geometrie der Streichmaschine der Online-Produktionsanlage Perlen PM4

Die Betriebsparameter der Maschine für die Simulation lauten:

- Coater: Speed Coater,
- Bahngeschwindigkeit: 1165 m/min,
- Flächengewicht Rohpapier: 41 g/m² otro, holzhaltig,
- Strichgewicht: 2 x 8.5 g/m²,
- Trocknungsluft im Konvektionstrockner: 300 °C,
- IR-Leistung: keine,
- Bahnfeuchte vor Coater: 1.8 %,
- Bahntemperatur vor Coater: 70 °C,
- Endfeuchte: 5.6 %.

Die in der Produktion verwendeten Materialien haben dabei folgende Eigenschaften:

- Dicke des Rohpapiers: 60 µm,
- Feststoffgehalt der Streichfarbe: 67 %,
- Temperatur der Streichfarbe: 40 °C,
- Immobilisierungspunkt der Streichfarbe: 83 % Feststoff.

Durch die Soft-Scrape-Methode wurde festgestellt, dass der Strich schon vor dem Airturn weitgehend verfestigt ist. Schon hier konnten nur noch Spuren des Striches von der Bahn entnommen werden. Die Papierbahn kurz nach dem Coater ist dagegen für Soft-Scrape-Messungen nicht zugänglich. So wird in der Simulation die Penetration durch den Anfangswert $m_{pen,0} = 1 \text{ g/m}^2$ und den Exponenten $C_{pen,1} = 7$ modelliert. Durch die Annahme der Werte für die Strichporosität und den Wärmeübertragungskoeffizienten können das simulierte Temperaturprofil und die Endfeuchte mit den Messungen harmonisiert werden. Der Wärmetransport erfolgt bei $\alpha = 230 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Die Strichporosität wird zu $\varepsilon_{free} = 25 \text{ \%}$ statt dem Standardwert 20 \% gesetzt. Beide Werte der Porosität befinden sich dabei im realistischen Bereich [JAM98].

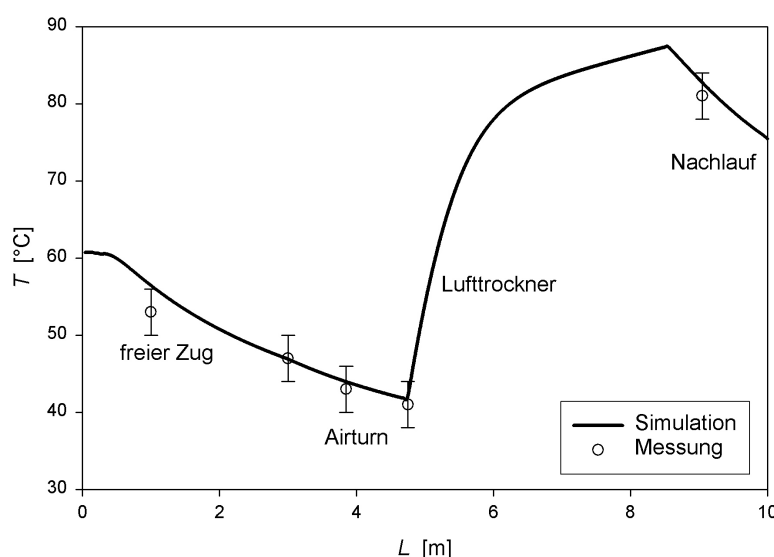


Abbildung 5.11: Verlauf der Bahntemperatur für die Trocknung der 60 g/m^2 - Sorte an der Perlen PM4 beim stationären Produktionsbetrieb. Die Fehlerbalken entstammen der Genauigkeit der angewendeten Messtechnik (Abschnitt 4.5).

Die Bahntemperatur sinkt durch den Einfluss der Umgebung im freien Zug nach dem Coater. Der erste Teil der Kurve verläuft wegen der schnellen Penetration flacher als der Rest: Das in das Rohpapier

eindringende Wasser wird absorbiert, wobei Sorptionswärme frei wird. Sie kompensiert am Anfang des freien Zuges die Kühlwirkung der Umgebung. Der nach dem freien Zug folgende, kalt betriebene Airturn unterscheidet sich bezüglich des Wärmetransports nicht vom freien Lauf. Danach wird die Bahn im Lufttrockner stark aufgeheizt und getrocknet. Zum Schluss der Trocknungskurve erfolgt eine Abkühlung im Nachlauf.

Mit den obigen Angaben lassen sich Temperatur und Feuchte in einem engen Toleranzbereich berechnen. Die berechnete Bahnfeuchte am Ende des Lufttrockners beträgt 6 %. Die nach dem Lufttrockner liegenden schwach beheizten Zylinder können keine starke Reduktion der Bahnfeuchtigkeit verursachen. So ist die errechnete Bahnfeuchte im Einklang mit dem nach den Zylindern gemessenen Wert von 5.6 %.

6 Kritische Analyse der Simulation

Das in Kapitel 3 aufgebaute Modellsystem für die Trocknung gestrichener Papiere beinhaltet zahlreiche Annahmen und Vereinfachungen. Dieses Modellsystem hat zum Ziel, möglichst zuverlässige Vorhersagen der Trocknung in Streichmaschinen zu liefern. Die Güte der Simulationsergebnisse kann durch Unsicherheiten bezüglich einiger Systemparameter gemindert werden. So muss Klarheit darüber herrschen, wie empfindlich die Berechnungsergebnisse auf Fehler in Messungen und Annahmen reagieren. Dies lässt sich durch eine Sensitivitätsanalyse abschätzen. Dadurch können diejenigen Systemparameter ermittelt werden, bei deren Handhabung besondere Vorsicht geboten ist.

Die Werte einiger Parameter sind aus der Prozessführung wohl bekannt, können jedoch während der Produktion Schwankungen unterliegen. So können das Flächengewicht, die Dicke bzw. die Dichte und der Fasergehalt des Rohpapiers sowie das Strichgewicht variieren. Andere Materialcharakteristika wie z.B. Sorptionsisothermen, Porositäten, Penetrationskinetik und der Immobilisierungspunkt der Streichfarbe können gemessen werden. Wegen des hohen experimentellen Aufwands werden sie aber in der Regel geschätzt, was mit einiger Unsicherheit verbunden ist. Schließlich gibt es einige Parameter, deren Werte durch Anpassung der Berechnung auf die Messdatenverläufe ermittelt werden. Diese Parameter charakterisieren die einzelnen Trocknungsmodule der Streichmaschine (Wärmeübertragungskoeffizienten, IR-Leistung) oder auch Materialeigenschaften (Sorptionskinetik). Die Werte der Anpassungsparameter sind dabei unmittelbar von den Schwankungen der Messwerte abhängig.

Bei der praktischen Durchführung der Sensitivitätsanalyse werden die oben benannten Systemparameter realistischen Variationen

unterworfen. Die Auswirkung auf die Simulation wird an einer für die Praxis typischen, aber imaginären Streichmaschine untersucht. Sie besteht aus einem ersten freien Zug (3 m), einem IR-Trockner (1.2 m), einem zweiten freien Zug (1 m), einem Lufttrockner (4 m) und einem freien Nachlauf (3 m). Die Bahngeschwindigkeit beträgt 1500 m/min. Ausgedrückt in den Wertepaaren Temperatur/ relative Feuchte sind die Luftzustände in den freien Zügen: (25 °C/ 50 %), (50 °C/ 25 %) und (30 °C/ 50 %). Der zweite freie Zug ist durch die aus dem IR-Modul mitgeschleppte Luft etwas wärmer als der erste und dritte Freilauf. Die Werte für Rohpapier, Strich und Penetration sowie für den Betriebspunkt sind in der folgenden Abbildung angegeben.

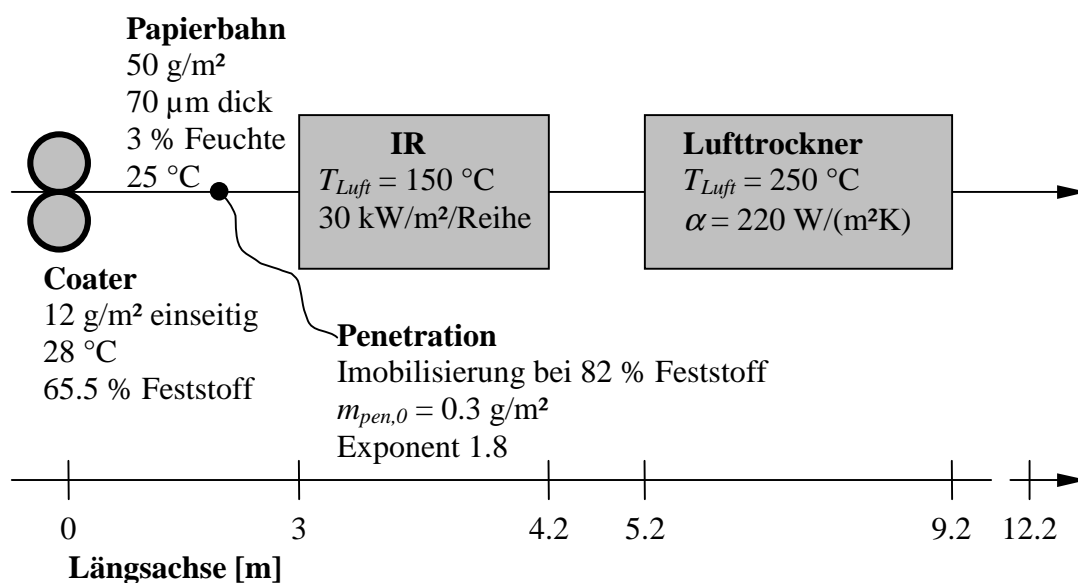


Abbildung 6.1: Streichmaschine und Betriebskonfiguration für die Sensitivitätsanalyse.

6.1 Verlaufsanalyse der Bahntemperatur

Bevor auf die eigentliche Sensitivitätsanalyse eingegangen wird, soll hier die Entstehung der Temperaturkurven in der Streichmaschine besprochen werden. Dies wird sich bei der Analyse der Trocknungsverläufe unter Parametervariationen als hilfreich erweisen.

Vorerst werden die Vorgänge im Lufttrockner ohne die Zuschaltung von IR-Modulen untersucht. Einen wesentlichen Einfluss auf die Kurvenform im Lufttrockner haben insbesondere die Mechanismen, die sich auf die kinetische Hemmung des Stofftransports beziehen: Das Verschließen der Oberfläche vom Strich bei seiner Austrocknung und das Immobilisierungsprozess des Striches (Abschnitte 3.3.5 und 3.3.6). Schaltet man diese Faktoren in der Simulation aus, so verhält sich der Strich wie eine freie Wasseroberfläche. Dabei entsteht ein degressiver Anstieg der Temperatur, die sich asymptotisch der Kühlgrenztemperatur annähert (Abbildung 6.2 unten). Würde man den Strich unter diesen Bedingungen vollständig austrocknen lassen, hätte dies durch das „Verschwinden der Wasseroberfläche“ eine weitere Aufwärmung der Bahn zur Folge.

Sobald aber das Verschließen der Strichoberfläche berücksichtigt wird, erfährt die Bahn, verglichen mit der ungehemmten Trocknung, einen verstärkten Temperaturanstieg. Die Kurve behält die degressiv steigende Form bei. Die Temperaturdifferenz steigt allerdings in der Laufrichtung der Maschine, bedingt durch das Verschließen der Oberfläche mit dem Fortschreiten der Austrocknung.

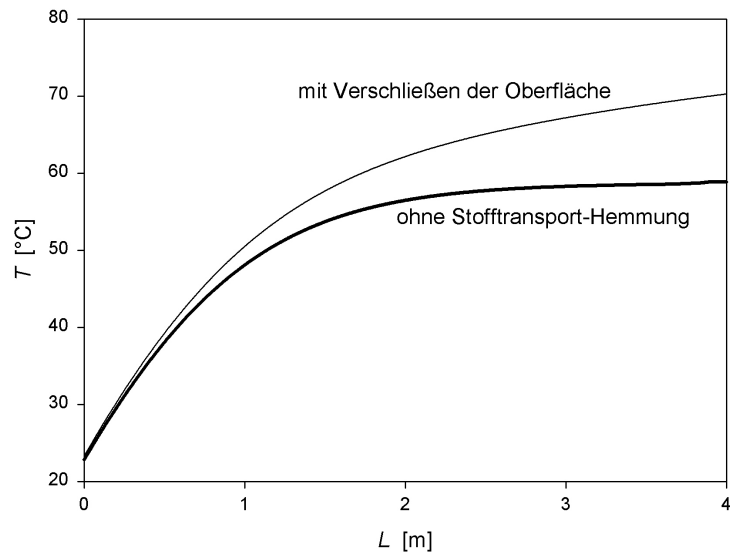


Abbildung 6.2: Verläufe der Bahntemperatur im Lufttrockner in Abhängigkeit von den aktiven Hemmungsmechanismen für den Stofftransport aus dem Strich (Immobilisierung, Verschließen der Oberfläche).

Nun wird das Verschließen der Oberfläche vernachlässigt, jedoch die Immobilisierung zugelassen.

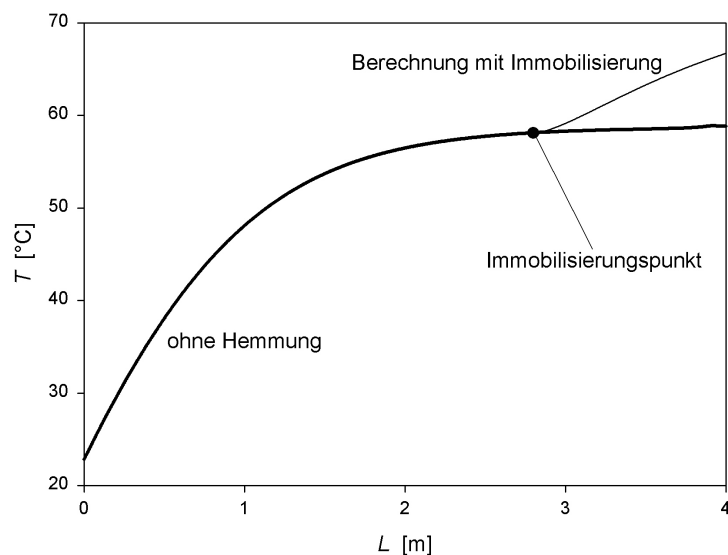


Abbildung 6.3: Unterschiede im Bahntemperaturverlauf des Lufttrockners mit und ohne die Berücksichtigung der Immobilisierung (hier ohne Verschließen der Oberfläche). Die beiden Kurven verlaufen vor der Immobilisierung gleich.

Die Trocknungsfront zieht sich nach dem Immobilisierungspunkt in das Strichinnere zurück. Dadurch wird der Stofftransportwiderstand erhöht. Die mangelnde Verdunstungskühlung läßt die Bahntemperatur progressiv steigen. Bis zum Erreichen des Immobilisierungspunktes haben die beiden Temperaturkurven den gleichen Verlauf. Danach kommt es zur Verzweigung. Die Temperatur des immobilisierten Striches steigt nach der Immobilisierung deutlich schneller als beim „ungehemmten“ Stofftransport.

Die beiden oben besprochenen Tendenzen erklären Form und Verlauf der Temperaturkurven, die in realen Maschinen entstehen. In einem solchen Fall ist die Überlagerung der beiden oben beschriebenen Mechanismen für die Einschränkung des Stofftransports verantwortlich. Die realen Bedingungen, die in einer Streichmaschine herrschen, werden anhand der Konfiguration aus Abbildung 6.1 mit eingeschalteter IR-Einheit untersucht.

Abbildung 6.4 zeigt, dass die Temperaturerhöhung im IR-Trockner fast linear verläuft. Dieses Verhalten ist dadurch begründet, dass dieses IR-Modul nur für die Aufwärmung der Bahn auf Betriebstemperatur konzipiert wurde. Dementsprechend findet dort zu wenig Verdunstung statt, als dass dies einen Einfluss auf den linearen Verlauf der Erwärmung unter konstanter Leistungsdichte haben könnte.

Im Konvektionstrockner steigt die Bahntemperatur zunächst degressiv bis zum Erreichen der Strich-Immobilisierung, ähnlich wie in Abbildung 6.2 dargestellt. Bis zu diesem Punkt wird die Verdunstungsrate nur durch das Verschließen der Strichoberfläche eingeschränkt. Nach der Immobilisierung des Striches wird der Stofftransport durch einen zusätzlichen Widerstand erschwert (Abbildung 6.3). Als Ergebnis dieser Überlagerung steigt die Bahntemperatur in diesem Bereich progressiv bis zum Ende des Lufttrockners.

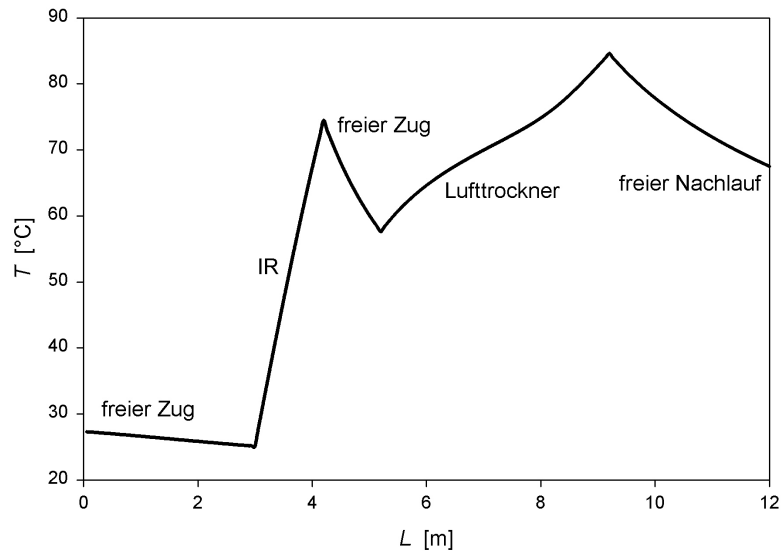


Abbildung 6.4: Bahntemperaturverlauf in der Streichmaschine aus Abbildung 5.11. Im IR-Trockner erfährt die Bahn dank der geringen Trocknungsrate eine fast lineare Erwärmung. Im Lufttrockner steigt die Temperatur erst degressiv und dann beim Einsetzen der Immobilisierung wieder progressiv.

6.2 Sensitivitätsanalyse

6.2.1 Parameter mit geringem Einfluss auf die Trocknung

Zuerst werden die Unsicherheiten, die in Verbindung mit den Eigenschaften des Rohpapiers stehen, untersucht: Flächengewicht m_P ($50 \pm 2 \text{ g/m}^2$), Dicke L_P ($70 \pm 5 \mu\text{m}$) und Fasergehalt $m_{P,cell}$ ($10 \pm 2 \%$) des Rohpapiers sowie die Anfangspenetration $m_{pen,0}$ ($0.3 \pm 0.3 \text{ g/m}^2$). Untersucht wird ebenso, was passieren würde, wenn man den Exponenten der Sorptionskinetik mit dem Basiswert 2 in den Grenzen von 1.6 bis 2.4 variieren würde. Wie sich herausstellte, haben diese Größen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Trocknungskurve.

6.2.2 Parameter die den Temperaturverlauf, aber nicht die Endfeuchte beeinflussen

Es gibt im Modellsystem einige Faktoren, die den Temperaturverlauf in der Streichanlage deutlich beeinflussen. Die Endfeuchte der Papierbahn bleibt dabei weitgehend unverändert, da sie nur vom Wasser- und Energieeintrag des Systems abhängt. Dabei verändern die Parameter, die im Folgenden dargestellt werden, den Energieeintrag nur geringfügig.

Der Exponenten der Penetration $C_{pen,1}$ aus Gleichung 97 hat in diesem Fallbeispiel den Wert 1.8. Für diese Variable sind starke Schwankungen im Betrieb z. B. um 100 % keine Seltenheit. Abbildung 6.5 zeigt, wie sich die Temperaturkurve ändert, wenn der Exponent von 1.8 bis auf 3.6 ansteigt. Die Erhöhung des Exponenten verursacht eine höhere Penetrationsgeschwindigkeit. Die dadurch bewirkte schnellere Austrocknung des Striches und dessen Oberfläche führt zur Differenzierung der beiden Temperaturkurven. Der schnell trocken werdende Strich im Falle eines hohen Penetrationsexponenten erlaubt im Vergleich zu einer wasserbenetzten Oberfläche eine niedrigere Verdunstungsrate. So erhitzt sich die Papierbahn im Lufttrockner für den Exponenten 3.6 durch eine vorerst geringere Verdunstungskühlung zu Beginn der Kurve stärker als für 1.8. Allerdings bedeutet die niedrigere Verdunstungsrate, dass die gestrichene Bahn insgesamt langsamer austrocknet. Aus diesem Grund fällt die Trocknungsrate für $C_{pen,1} = 3.6$ mit der Zeit langsamer ab, die Bahntemperatur nimmt langsamer zu. Durch ihren insgesamt flacheren Verlauf wird die zum Exponenten 3.6 gehörende Temperaturkurve im Lufttrockner von der Kurve mit $C_{pen,1} = 1.8$ überschritten.

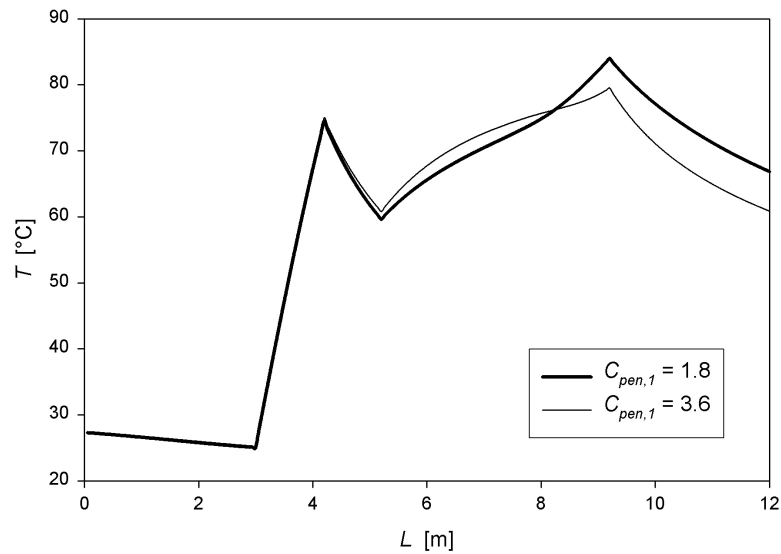


Abbildung 6.5: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve nach dem Aufstieg des Penetrationsexponenten von 1.8 auf 3.6. Die Endfeuchte der Bahn bleibt dabei erhalten.

Die Unsicherheit bezüglich der Strichporosität ε hat einen ähnlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis wie der Penetrationsexponent $C_{pen,1}$ (Abbildung 6.6).

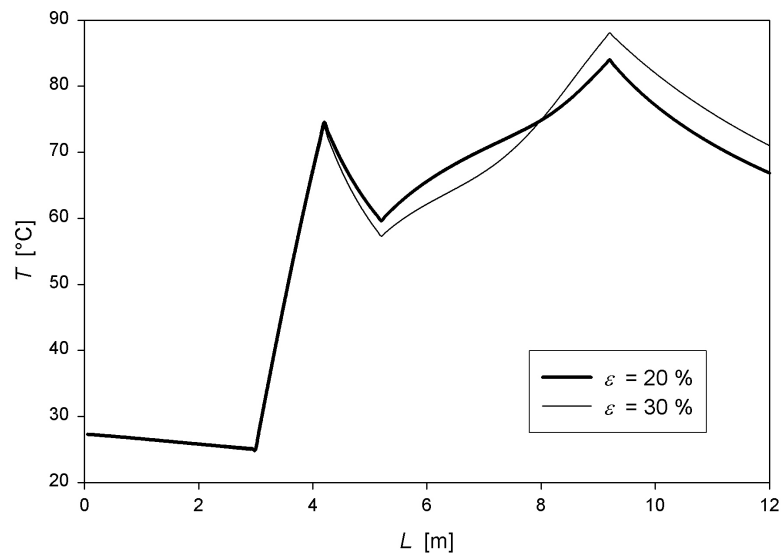


Abbildung 6.6: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve durch die Variation der Strichporosität im Bereich zwischen 20 und 30 %. Die Endfeuchte der Bahn bleibt dabei praktisch gleich (5.3 % \rightarrow 5.1 %).

Da die Messung der Strichporosität mit einem sehr hohen experimentellen Aufwand verbunden ist, wird sie hier mit $\varepsilon = 20 \%$ angenommen. Den Fehler, den man durch diese Annahme macht, kann durch die Auswirkung der Variation dieses Parameters im Rahmen des Wertebereichs (20 bis 30 %, [JAM98]) festgestellt werden. Die zu den beiden Grenzporositäten gehörende Temperaturkurven werden in der obigen Abbildung dargestellt. Eine hohe Porosität bedeutet einen niedrigen Widerstand bei der Verdunstung aus dem Strich. Dies ermöglicht eine schnelle Austrocknung der Bahn und eine rasche Abnahme der Trocknungsrate. Das Umgekehrte ist der Fall bei niedriger Strichporosität, so dass für $\varepsilon = 20 \%$ eine flachere und für $\varepsilon = 30 \%$ eine steiler ansteigende Temperaturkurve entsteht. Durch den geringeren Widerstand gegenüber dem Stofftransport liegt die Endfeuchte der Bahn für $\varepsilon = 30 \%$ mit 5.1 % um 0.2 % tiefer als für $\varepsilon = 20 \%$.

Ein dritter Faktor, der die Temperaturkurve deutlich, die Endfeuchte aber kaum beeinflusst, ist der Korrekturfaktor C_{geo} der Wärmeübertragung in freien Zügen (Gleichung 38). Nimmt C_{geo} den Wert 1 an, so gilt für die Wärmeübertragung das Modell einer parallel angeströmten ebenen Platte. In manchen Fällen lässt sich die Strömung, die das Papier erfährt, nicht mit einfachen, aus der Literatur entnommenen Korrelationen beschreiben. So kommt es vor, dass der Korrekturfaktor C_{geo} bis auf 0.4 herabgesetzt werden muss (Abschnitt 5.5.1). Dadurch wird die Wärmeübertragung bzw. die Abkühlung in den freien Zügen deutlich reduziert.

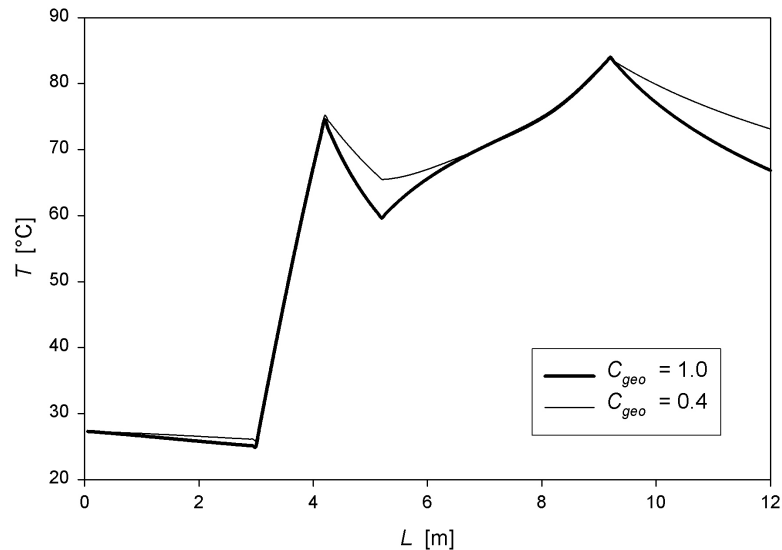


Abbildung 6.7: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve nach der Reduktion des Korrekturfaktors der Wärmeübertragung in freien Zügen von 1.0 auf 0.4. Die Endfeuchte der Bahn bleibt dabei weitgehend erhalten (5.3 % → 5.5 %).

Eine intensive Wärmeübertragung bedeutet auch einen regen Stofftransport. So verursacht die Reduktion der Wärmeübertragung, die mit der Verringerung von C_{geo} einher geht, einen Anstieg der Endfeuchte von 5.3 auf 5.5 %. Die Endfeuchte der Bahn ändert sich nur unwesentlich, da sich die Energieeinträge und Trocknungsraten in den freien Zügen auf einem niedrigen Niveau befinden.

Auch die von der Papierbahn absorbierte IR-Leistung P_{IR} hat bei der in Abbildung 6.1 dargestellten Konfiguration nur eine marginale Bedeutung für die Endfeuchte. Die IR-Module dienen im hier untersuchten Fallbeispiel lediglich zur schnellen Aufwärmung der Bahn. Sie haben wegen ihrer ungünstigen Strömungsverhältnisse eine untergeordnete Rolle beim Stofftransport.

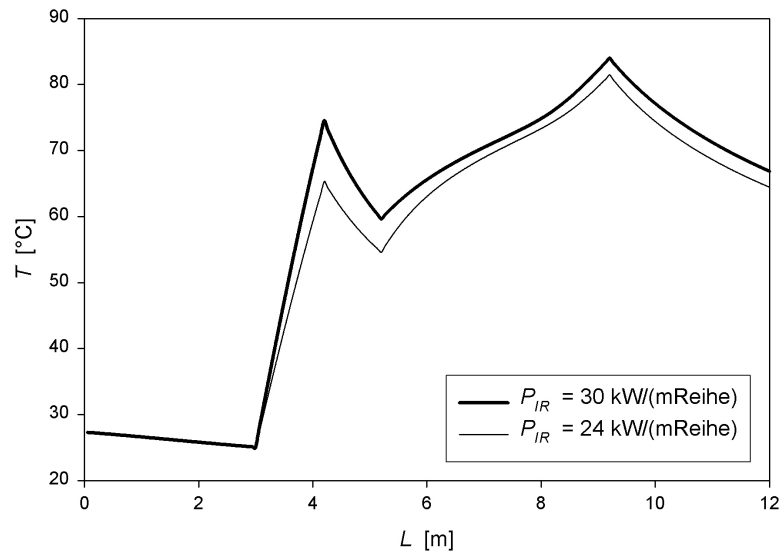


Abbildung 6.8: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve bei der Änderung der IR-Leistung zwischen 24 und 30 kW/Reihe/m. Die Endfeuchte der Bahn bleibt dabei weitgehend erhalten (5.3 % → 5.5 %).

Unsicherheiten bezüglich der IR-Leistung treten in Verbindung mit dem Typ und dem geleisteten Betriebsdauer der Strahler auf. Wenn man diese nicht kennt, so muss man die Leistung schätzen. In der obigen Abbildung werden zwei Strahler mit den Energiedichten $P_{IR} = 24$ und $30 \text{ kW}/(\text{m} \cdot \text{Reihe})$ betrachtet. Die beiden Werte bezeichnen eine in der Praxis übliche Leistung sowie die zur Zeit erreichbare Obergrenze. Die in das System eingebrachte Mehrleistung macht sich am Verlauf der Temperatur bemerkbar. Sie ist aber bezogen auf die Energien, die für die Verdampfung von größeren Wassermengen notwendig sind, zu niedrig. So ändert sich die Endfeuchte um 0.2 %-Punkte auf 5.5 %.

6.2.3 Parameter die den Temperaturverlauf und die Endfeuchte der Papierbahn beeinflussen

Nun kommen wir zu den Systemparametern, deren Unsicherheiten sowohl auf den Temperaturverlauf, als auch auf die Endfeuchte einen entscheidenden Einfluss haben. Einer davon ist das Strichgewicht m_C . Der Wert von m_C ist in der Regel aus dem Prozessleitsystem einer Streichmaschine bekannt. Er kann allerdings beim Produktionsbetrieb Schwankungen unterliegen. Wird auf das Rohpapier weniger Strich aufgetragen, so senkt dies die Feuchtigkeit der Bahn. Weniger Feuchtigkeit bewirkt weniger Verdunstung und dadurch höhere Bahntemperaturen. Dies ist insbesondere der Fall während der Phase intensiver Trocknung im Lufttrockner. Hier kommt es zu einer starken Differenzierung der Temperatur in Abhängigkeit vom Strichgewicht. Ein durchaus realistischer Unterschied im Strichgewicht von 10 % bezogen auf den Grundwert von $m_C = 12 \text{ g/m}^2$ bewirkt eine Temperaturänderung von bis zu $5 \text{ }^\circ\text{C}$ am Ende des Lufttrockners. Diese Abweichung wird auch im freien Zug nach dem Lufttrockner nicht ausgeglichen.

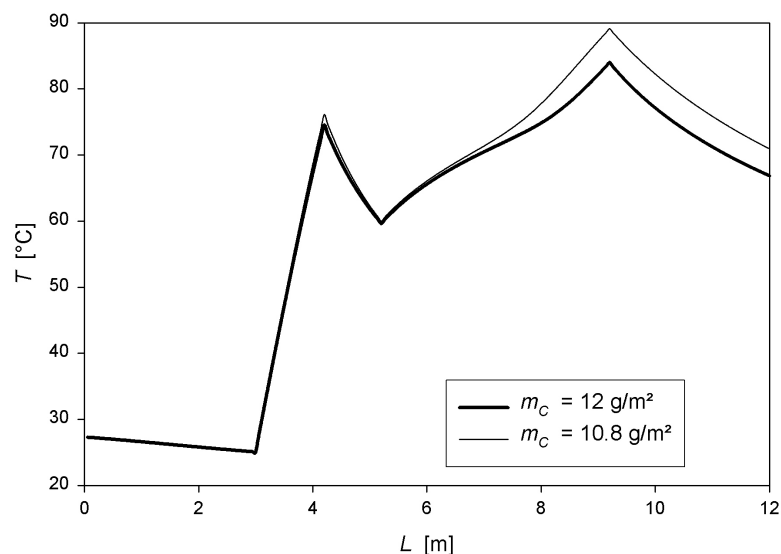


Abbildung 6.9: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve bei $\pm 10 \%$ Unterschied im Strichgewicht und einem Basiswert von 12 g/m^2 . Die Endfeuchte der Bahn ändert sich dabei deutlich: um $\pm 0.6 \%$.

Das Strichgewicht bewirkt im IR-Trockner kaum einen Temperatureffekt, da hier nur wenig Stofftransport stattfindet. Die geringfügigen Unterschiede in der Bahntemperatur stammen von den Differenzen in der Wärmekapazität, die durch weniger Strichgewicht reduziert wird und eine höhere Aufwärmung der Bahn zulässt.

Gleichzeitig zum niedrigeren Wassereintrag beim reduzierten Strichgewicht wird durch die geringere Dicke der Strichschicht auch der Stofftransportwiderstand herabgesetzt. Hierdurch erhält man am Ende der Trocknungsstrecke eine reduzierte Bahnfeuchte. Bei einem Strichgewicht von 12 g/m^2 beträgt sie 5.3 %, gegenüber dem Fall mit 10 % weniger Strich und 4.6 % Endfeuchte.

Der Immobilisierungspunkt ist eine auf einfache Weise messbare Stoffeigenschaft der Streichfarbe und liegt im Bereich zwischen 78 und 86 % Feststoffgehalt. Unsicherheiten bezüglich seiner Größe treten erst auf, wenn man einen Streichvorgang mit unbekannter Streichfarbe simulieren will, z. B. zwecks Auslegung einer Maschine. Der Immobilisierungspunkt hat für Temperatur- und Feuchteverläufe entlang der Streichmaschine eine umfassende Bedeutung. Der Mechanismus, der sich dahinter verbirgt, ist mit dem Verhalten der Trocknungsfront zu erklären. Diese befindet sich vor der Immobilisierung auf der Strichoberfläche. Hat der Strich seinen Immobilisierungspunkt überschritten, so zieht sich die Trocknungsfront in das Strichinnere zurück. Da nun die Verdunstung durch die Porenmatrix des Striches erfolgen muss, hemmt dies die Verdunstungsrate. Demzufolge hat man bei einem niedrig liegenden Immobilisierungspunkt, der früh erreicht wird, auch einen früheren Anstieg der Bahntemperaturen als bei einem späten Einsetzen der Immobilisierung.

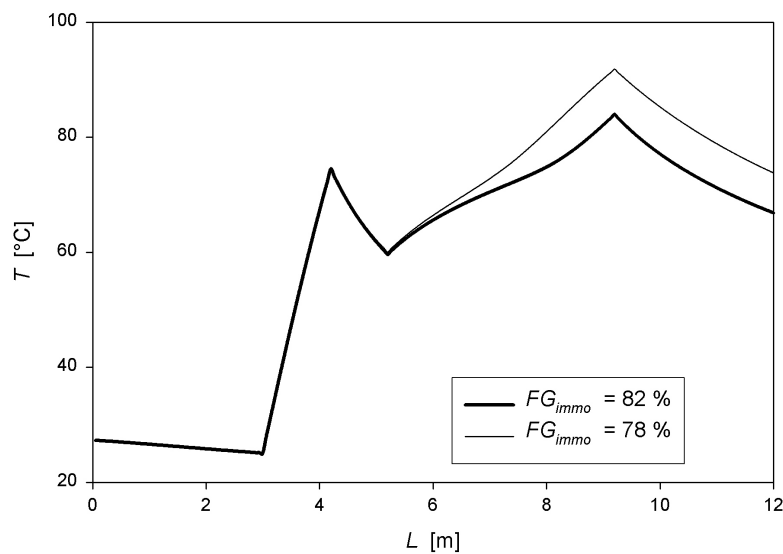


Abbildung 6.10: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve beim Herabsetzen des Immobilisierungspunktes von 82 auf 78 %. Die Endfeuchte der Bahn ändert sich dabei von 5.3 auf 5.8 %.

Beim Herabsetzen des Immobilisierungspunktes von 82 auf 78 % Feststoff erfährt die Bahn durch geringere Verdunstungskühlung eine stärkere Aufwärmung. Der Temperaturunterschied verschärft sich im Laufe der Trocknung. Der Maximalwert der Temperaturdifferenz wird am Ende des Lufttrockners erreicht: 8 °C. Diese Differenz klingt auch im freien Nachlauf nicht mehr ab.

Durch die erschwerte Verdunstung nach einer früher Immobilisierung bei 78 % Strich-Feststoff behält die Bahn mit 5.8 % mehr Feuchtigkeit als beim 82 %-Immobilisierungspunkt (5.3 %).

Zuletzt wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der Wärmeübergangskoeffizient α im Konvektionstrockner analysiert. Er hat als Haupt-Anpassungsparameter des Modellsystems eine hohe Bedeutung. Gleichzeitig ist er mit hohen Unsicherheiten verbunden: Jeder Lufttrockner weist abhängig von Bauart und Betriebspunkt bezüglich der Wärmeübertragung ein anderes Charakteristikum auf. So muss die α -Zahl dementsprechend für jeden Trocknertyp neu

angenommen werden. Im vorliegenden Fallbeispiel wird der Wert $\alpha = 220 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angesetzt. In der unten stehenden Abbildung wird gezeigt, was bei einer 10-prozentigen Erhöhung von α im Lufttrockner passiert.

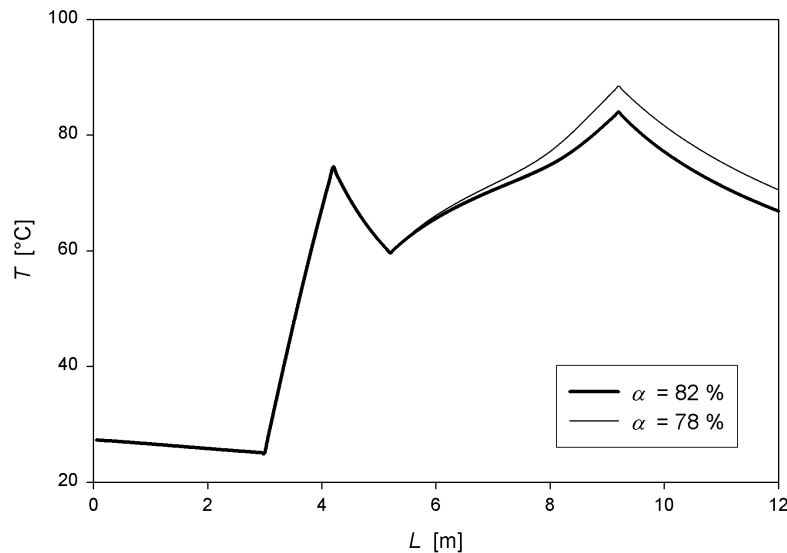


Abbildung 6.11: Sensitivitätsanalyse: Änderung der Temperaturkurve bei der Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten um 10 %. Die Endfeuchte der Bahn ändert sich dabei von 5.3 auf 5.0 %.

Die um 10 % gesteigerte Wärmeübertragungsrate im Lufttrockner liefert erwartungsgemäß eine Überhöhung der Temperatur. Die maximale Temperaturdifferenz beträgt dabei 5 °C. Wegen der direkten gegenseitigen Abhängigkeit von Wärme- und Stofftransport werden bei intensiviertem α erhöhte Trocknungsraten bewirkt. Dies manifestiert sich in der etwas abgesunkenen Endfeuchte von 5.0 % gegenüber dem ursprünglichen Wert von 5.3 %.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neu entwickeltes Modellsystem für die Berechnung der Trocknung in industriellen Streichmaschinen vorgestellt. Es beruht auf der Lösung der Bilanzgleichungen für Stoff- und Wärmetransport. Zur Beschreibung der thermischen Randbedingungen von Streichanlagen müssen alle drei Mechanismen der Wärmeübertragung berücksichtigt werden: Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung. Es werden dünne Papiersorten untersucht, so dass sich über die Papierdicke keine Temperaturgradienten aufbauen können. Zusätzlich kann die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung vernachlässigt werden, da hier nur Anlagen ohne Kontakttrocknung untersucht werden. Die radiative Wärmeübertragung wird mit Hilfe des Graustrahler-Modells abgebildet. Für die Beschreibung des Wärmeübergangs bei Konvektion werden Nusselt-Beziehungen eingesetzt. Dabei verwendet man das Modell einer parallel angeströmten ebenen Platte für freie Züge. Die Konvektion in den IR-Modulen wird als ebener Kanal abstrahiert. Wegen der Komplexität der Strömung in den Lufttrocknern werden dort selbst entwickelte empirische Korrelationen eingesetzt. Sie beinhalten die Temperatur der Trocknungsluft und die Bahngeschwindigkeit als Parameter.

Nach dem Auftragen der Streichfarbe gelangt flüssiges Wasser durch Penetration (kapillares Saugen) in das Rohpapier. Dabei lagern sich Pigmente aus dem Strich an der Grenzfläche zum Rohpapier an und bilden dort eine verdichtete Schicht, die einer weiteren Entwässerung entgegenwirkt. Je mehr Wasser ins Papier penetriert, um so dicker wird der Filterkuchen, der einen steigenden Stofftransportwiderstand darstellt. Dies genügt jedoch nicht um die Penetration zum Stillstand zu bringen. Im neu entwickelten Ansatz für die Penetration wird der Strich als dünne Schicht modelliert. Der Strich beinhaltet also eine beschränkte Menge an Flüssigkeit, die

aus diesem durch Penetration entnommen werden kann. Um das asymptotische Abklingen der Penetration mit der Zeit zu berücksichtigen, wird beim Modellieren ein zusätzlicher Widerstandstherm eingeführt. Dieser wächst proportional zur Menge der bereits penetrierten Flüssigkeit.

Neu entwickelte Versuche, bei denen dem Strich ein wasserlöslicher Tracer beige setzt wird, zeigen, dass sich die penetrierte Flüssigkeit nicht gleichmäßig über den Papierquerschnitt verteilt. Die Entwässerung des Striches erfolgt in die strichseitige Oberflächenschicht des Rohpapiers hinein. Dort entsteht ein Bereich erhöhter Feuchtigkeit. Die darunter liegende Papierschicht wird dagegen durch den Flüssigkeitsstrom nicht beeinflusst und verbleibt trocken. So ergeben sich drei Zonen mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsniveaus, die beim vorliegenden Berechnungsmodell berücksichtigt werden und für die jeweils eine eigene Massenbilanz aufgestellt wird: Strich, feuchte Papierzone und trockene Papierzone.

Der eigentliche Mechanismus der Trocknung von gestrichenem Papier ist die Verdunstung. Eigene Versuche im Labor- und Pilotmaßstab zeigen, dass der Strich mit zunehmender Austrocknung eine immer kleiner werdende Verdunstungsrate aufweist. Diesbezüglich kann das Austrocknungsverhalten aller Streichfarben unabhängig von ihrer Zusammensetzung mit der gleichen Korrelation beschrieben werden. Ebenfalls wird bei der Berechnung der Verdunstung im neuen Modell die Dickenzunahme der luftseitigen Grenzschicht bei hohen Massenströmen berücksichtigt. Die Verdunstung aus dem Strich erfolgt bis zum Erreichen des Immobilisierungspunktes von seiner Oberfläche aus. Wird die Trocknung weitergeführt, so zieht sich die Trocknungsfront in das Strichinnere zurück. Der Dampfstrom aus dem Strich muss nun zusätzlich den Weg durch die Porenräume der ausgetrockneten Strichschicht bzw. des Rohpapiers bestreiten. Die Verdunstung aus der feuchten und der trockenen

nen Papierzone erfolgt beidseitig, durch das Papier und den Strich hindurch.

Die für die Simulation benötigten Parameter werden aus der Literatur entnommen, aus der Theorie hergeleitet oder experimentell bestimmt. Hierfür wurden neue experimentelle Methoden zur Erfassung der Penetration entwickelt. Dazu gehört die Verfolgung der Strichentwässerung durch die verbesserten Scrape-Off-Messungen mit elastischem Schaber. Außerdem ist es möglich, die Penetrationstiefe des Serums in das Rohpapier mittels Tracer zu bestimmen. Eine neue Labormethode ermöglicht die Messung vom Feststoffgehalt der Streichfarbe am Immobilisierungspunkt.

Zur Validierung des Modellsystems wurden gemessene Endfeuchten und Bahntemperaturverläufe mit den Simulationsergebnissen verglichen. Die entsprechenden Messungen wurden an Streichmaschinen im Pilot- und Produktionsmaßstab für einfach gestrichenes Papier durchgeführt. Dabei wurde der Betriebspunkt der Maschinen breitbandig variiert. Die Ergebnisse der Validierung zeigen, dass anhand des neu entwickelten Modellsystems eine zuverlässige Berechnung der Trocknung gestrichener Papiere in industriellen Anlagen durchgeführt werden kann.

8 Literatur

- [AAB02] Alexander, C., Axelrod, S., Belotserkovsky, E., MacHattie, R., Watson, D.: New insight into coating consolidation through an on-line tool. Control Systems Conference 2002 (2002), S.303
- [AAG99] Ahlroos, J., Alexandersson, M., Grön, J.: Influence of base-paper filler content and precalendering on metered film press coating-paper and print quality. Tappi Journal 5 (1999), S. 94
- [ABK00] Akerholm, J., Berg C.G., Kirstila V.: An Experimental Evaluation of the Governing Moisture Movement Phenomena in the Paper Coating Process. Part II: Experimental. Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS2000 (2000) Paper No. 49
- [Ake96] Aker, E.: A Simulation Model for Two-Phase Flow in Porous Media. Thesis for the Degree of Candidatus Scientiarum, Department of Physics, University of Oslo (1996)
- [AsB94] Aspler, J.S. and Béland, M.C.: A Review of Fiber Rising and Surface Roughening effects in Paper. Journal of Pulp and Paper Science 20 (1994), S. J27
- [Aus96] Aust, R.: Verfahrenstechnische Aspekte der Trocknung beschichteter Materialbahnen. Dissertation, Universität Erlangen, Technische Fakultät (1996)
- [BAK00] Berg C.G., Akerholm J., Karlsson M.A.: An Experimental Evaluation of the Governing Moisture Movement Phenomena in the Paper Coating Process. Part I: Theoretical Aspects. Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS2000 (2000) Paper No. 48
- [BaS94] Baehr, H.D., Stefan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Springer (1994)
- [Bau80] Baumeister, M., "Quality Optimization by Control of Coating Structure," Tappi 1980 Coating Conference Proceedings (1980), S. 11
- [BeB96] Bernada, P., Bruneau, D.: Modeling of Binder Migration during Drying of a Paper Coating. Tappi Journal, 79 (1996), S. 130

- [BeB96a]** Bernada, P., Bruneau, D.: Séchage d'un enduit pigmenté avec application à l'étude d'une couche papetière. *Journal de Physique III (France)*, 6 (1996), S. 907
- [BeB97]** Bernada, P., Bruneau, D.: Drying of a Paper Coating: Experimental Study and Modelling. *Drying Technology*, 15. (1997), S. 2061
- [Bed98]** Bédard, N.: Laboratory testing of radiant gas burners and electric infrared emitters. *Experimental Heat Transfer* 11 (1998), S. 255
- [Bos96]** Boström, B.: Dynamic wetting and sorption on coated papers. *Paper Technology* 37 (1996), S.31
- [Bra80]** van Brakel, J.: Mass Transfer in Convective Drying. *Advances in Drying*, Vol. 1 (1980), S.217
- [BrH79]** van Brakel, J., Heertjes P.M.: On the Period of Constant Drying Rate. *Proceedings Of the 1st International Drying Symposium 1979* (1979), S. 70
- [BrP99]** le Bray, Y., Prat, M.: Three-Dimensional Pore Network Simulation of Drying in Capillary Porous Media. *International Journal of Mass and Heat Transfer* 42 (1999), S. 4207
- [BSL60]** Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N.: *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, Inc. (1960)
- [BWH97]** Brotz, F., Willenbacher, N., Hanciogullari, H.: Analysis of Coating Color Runnability Considering the Effect of Dewatering. Part 2: Numerical Simulation of the Complete Coating Process, Aus: *Tappi Advanced Coating Fundamentals Symposium 1997*, S. 9
- [CER01]** Cerestar Press Archive: Cerestar Upgrades Pilot Facilities. www.cerestar.com/html/releases_39.html (16.7.2001)
- [Cha74]** Chance, J.: Experimental Investigation of Air Impingement Heat Transfer under an Array of Round Jets. *Tappi Journal* 57 (1974), S. 108
- [ChC70]** Chapman, S. und Cowling, T.G.: *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*. Cambridge University Press, Cambridge, 3rd. ed. (1970)

- [Chr60]** Christensen, G.N.: Kinetics of sorption of water vapour by wood I.: The effect of sample thickness. Australian Journal of Applied Science 11 (1960), S. 294
- [ChS90]** Chen, K., Scriven, L.: Liquid Penetration into a Deformable Porous Substrate. Tappi Journal 73 (1990), S. 151
- [CRT97]** Chatterjee, S.G., Ramarao, B.V., Tien, C.: Water-Vapour Sorption Equilibria of a Bleached-Kraft Paperboard - A Study of the Hysteresis Region. Journal of Pulp and Paper Science.. 23 (1997), S. J366
- [CTP]** Centre Technique du Papier - *The Pulp and Paper Research & Technical Centre*
Domaine Universitaire - BP 251 - 38044 GRENOBLE - Cedex 9 - FRANCE.
http://www.webctp.com/ctp/default_gb.html (4.4.2003)
- [DiL97]** Dickson, R., LePoutre, P.: Mechanical interlocking in coating adhesion to paper. Tappi Journal, 80 (1997), S.149
- [Dob75]** Dobson, R.L.: Burnout, a coat weight determination test re-examined. Tappi Conference 1975, S. 125
- [DSG86]** Daub, E., Sindel, H., Göttching, L.: Absorption von Flüssigkeiten in Papier, Teil 1. Das Papier 40 (1986), S. 188
- [Dul92]** Dullien, F.A.L.: Porous Media. Fluid Transport and Pore Structure, Second Edition. Academic Press, San Diego San Francisco etc. (1992), S. 163
- [EIO92]** Enomae, T., Inada, H., Onabe, F., Usuda, M.: Continuous Rapid Measurements of Increase in Paper Thickness due to Swelling Using Newly-Developed Differential Transformer System. Japan Tappi, 46. (1992), S. 790
- [EKO99]** Enomae, T., Kataoka, H., Onabe, F.: In-Plane distribution of paper absorbency measured by liquid absorption profilometer. Sen'i Gakkaishi, 55 (1999), S. 301
- [Eng94]** Engström, G.: Formation and consolidation of a coating layer and the effect on offset-print mottle. Tappi Journal 4 (1994), S. 160
- [EnL92]** Engström, G., Lafaye, J.F.: Precalendering and its effect on paper-coating interaction. Tappi Journal 8 (1992), S. 117

- [EnL97]** Enomae, T., Lepoutre, P.: Surface roughening by water: Gloss Relaxation processes. *Journal of Pulp and Paper Science* 23 (1997), S. J1
- [EnL98]** Enomae, T. and Lepoutre, P.: Observation of the Swelling Behavior of Kraft Fibers and Sheets in the Environmental Scanning Electron Microscope. *Journal of Pulp and Paper Science*, 13 (1998), S. 280
- [EnL99]** Enomae, T., Lepoutre, P.: Mechanism and dynamics of the roughening of paper in contact with moisture. 40th International Symposium „Moisture and creep effects on paper, board and containers“, EFPG Grenoble, France (1999)
- [EnR85]** Engström, G., Rigdahl, M.: In situ studies of water drainage from wet coating layers. *TAPPI Coating Conference* 1985, S. 31
- [EnR86]** Engström, G., Rigdahl, M.: In-situ studies of water drainage from wet coating layers. *Tappi Journal* 69 (1986), S. 86
- [EnR94]** Engström, G. and Morin, V.: Quantitative description of the increase in surface roughness of the base paper during coating. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 9 (1994), S. 106
- [ERK91]** Engström, G., Rigdahl, M., Kline, J., Ahlroos, J.: Binder distribution and mass distribution of the coating layer – cause and consequence. *TAPPI Coating Conference* 1991, S. 169
- [ErR94]** Eriksson, U., Rigdahl, M.: Dewatering of Coating Colours Containing CMC or Starch. *Journal of Pulp and Paper Science*, 20. (1994), S. J333
- [ESK99]** Enomae, T., Sasaki, K., Kim, B.-Y., Onabe, F.: Anisotropy of internal stress related to paper surface roughening. *Tappi advanced coating fundamentals symposium* 1999, S. 133
- [FFK91]** Fujiwara, H., Fujisaki, N., Kaga, C.: The effect of water penetration on offset mottling (2) The effect of dwell time on offset mottling with a VDTA coater. *Tappi Coating Conference* 1991, S. 179
- [FFS89]** Fujiwara, H., Fujisaki, N., Shimizu, I., Kaga, C.: The effect of water penetration on offset mottling. *Tappi Coating Conference* 1989, S. 121

- [FLO91]** Farkas, I., Lampinen, M.J., Ojala, K.: Water Flow and Binder Migration during Drying of Coated Paper. *Drying Technology* 9 (1991), S. 1019
- [For97]** Forseth, T.E.F.: Moisture-Induced Roughening of Paper Containing Mechanical Pulp PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Chemical Engineering (1997)
- [GaH89]** Gane, P.A.C. and Hooper, J.J.: An Evalution of Interactions Between Coating Colour and Base Paper by Coating Profile Analysis. *Fundamentals of Papermaking* (C.F. Baker, Ed.) MEP Publications, London, Vol. 2 (1989), S. 871
- [Gar82]:** Garey, C.L.: Surface porosity of coated paper. *Tappi Coating Conference* 1982, S. 117
- [GaS03]** Gao, X., Sundén, B.: Experimental investigation of the heat transfer characteristics of confined impinging slot jets. *Experimental Heat Transfer* 16 (2003), S. 1
- [GHB91]** Gane, P.A.C., Hooper, J.J., Baumeister, M.: The influence of furnish content on formation and basesheet profile stability during coating. *Tappi Journal* 9 (1991), S. 193
- [GrA98]** Grön, J. and Ahlroos, J.: Influence of Base Paper Filler Content and Pre-calendering on Metered Film Press Coating - Part I: A Coating Process Study. *TAPPI Coating and Papermakers Conference* 1998, S. 899
- [Gya70]** Gyarmati, I.: *Non-equilibrium Thermodynamics, Field Theory and Variational Principles*. Aus der Reihe Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek, Hrsg. Szabo, I., Springer Verlag (1970)
- [Har89]** Harrmann, M.: Dynamische Simulation des Sichter/Trockners einer Müllverbrennungsanlage mit einem neuen Trocknungsmodell für Papier. *VDI Fortschrittsberichte, Reihe 3, Nr. 178*, VDI Verlag (1989)
- [HaS90]** Harrmann, M., Schulz, S.: Convective Drying of Paper Calculated with a New Model of the Paper Structure. *Drying Technology*, 8. (1990), S. 667

- [Hei92]** Heikkilä, P.: A Study on the Drying Process of Pigment Coated Paper Webs. Report Nr. 92-125-A, Abo Akademi, Finland, (1992)
- [HeP00]** Heikkilä, P., Rajala, P.: Papermaking Science and Technology. Band 11: Pigment Coating and Surface Sizing of Paper. Kapitel 26: Drying of paper coatings and drying equipment. Inso Corporation 1990-2000
- [Hil69]** Hilgeroth, E.: Wärmeübergang bei Schlitzdüsenströmung. Chemie-Ingenieur Technik 41 (1969), S. 731
- [HTK00]** Heikkilä, P., Timofeev, O., Kiiskinen, H.: Papermaking Science and Technology. Band 9: Papermaking Part 2, Drying. Kapitel : Multicylinder Dryer. Inso Corporation 1990-2000
- [HuL95]** Huang, T., LePoutre, P.: Coating-paper – the effect of basestock roughness, absorbency and formation on coated paper properties. Paperi ja Puu 8 (1995), S. 484
- [HuL96]** Huang, T., Lepoutre, P.: Effect of basestock absorbency on coating „hold-out“ and coated paper properties. Tappi Coating Conference 1996, S. 167
- [JAM98]** Johnson, R.W, Abrams, L., Maynard, R.B., Amick, T.J.: Use of Hg Porosimetry to Characterize Pore Structure and Model End-Use Properties of Coated Papers. Tappi Coating Conference 1998, S. 337
- [Joh78]** Johns, R.: Airfoils vs. Aircap Drying. Tappi Journal 61 (1978), S. 41
- [KaM87]** Kaviany, M., Mittal, M.: Funicular State in Drying of a Porous Slab. International Journal of Mass and Heat Transfer 30 (1987), S. 1407
- [Kar89]** Kartovaara, I.: Coatweight distribution and coating coverage in blade coating. Paperi ja Puu 9 (1989), S. 1033
- [Kas72]** Kast, W.: Zur Frage der Analogie zwischen Wärme- und Stoffaustausch. Wärme- und Stoffübertragung 5 (1972), S. 15
- [Kas80]** Kast, W.: Näherungslösung für den Einfluß eines wandnormalen Massenstroms auf die Wärme-, Stoff- und Impulsübertragung. Wärme- und Stoffübertragung 13 (1980), S. 217

- [KaS82]** Karlsson, M., Soininen, M.: The influence of the hygroscopic properties of paper on the transient phenomena during contact drying of paper webs. 3rd International Drying Symposium (1982), S. 494
- [KCL03]** KCL Services, Pilot Services: www.kcl.fi/serv/coat.html (27.5.2003)
- [KDW98]** R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M.E. Coltrin, J.A. Miller, H.K. Moffat: A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase, Multicomponent Transport Properties. The CHEMKIN Collection III. Heft TRANSPORT – User Manual. ReactionDesign (1998) – {Software vorhanden an der EKT/TUD}
- [KLH98]** Kiiskinen H.T., Lyytikäinen, K., Hämäläinen, J.P.: Specific Heats of Dry Scandinavian Wood Pulps. Journal of Pulp and Paper Science 24 (1998), S.219
- [Kne75]** Kneule, F.: Das Trocknen, Grundlagen der chemischen Technik. 3. Auflage, Verlag Sauerländer (1975)
- [Koc50]** Koch, B.: Grundlagen des Wärmetausches (Stoffwerte). Dissen T.W., Verlagsanstalt H. Beucke & Söhne (1950)
- [Kri62]** Krischer, O.: Vorgänge der Stoffbewegung durch Haufwerke und porige Güter bei Diffusion, Molekularbewegung sowie laminarer und turbulenter Strömung. Chemie-Ingenieur-Technik 34 (1962), S. 154
- [KrK92]** Krischer, O., Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Band 1, dritte Auflage. Springer (1992)
- [KTC95]** Kuang, H.-D., Thibault, J., Chen, R., Grandjean, B.P.A.: Pilot Scale Investigation of Infrared Drying of Paper. Tappi Journal, 78 (1995), S. 129
- [KTG94]** Kuang, H.-D., Thibault J., Grandjean, B.P.A.: Study of Heat and Mass Transfer during IR Drying of Paper. Drying Technology, 12. (1994), S. 545
- [Lam79]** Lampinen, M.: Mechanics and Thermodynamics of Drying PhD Thesis. Acta Polytechnica Scandinavica. Mechanical Engineering Series No. 77. Helsinki University of Technology. Espoo. Finland (1979)
- [Lam85]** Lampinen, M.: Application of Turbulence Theory to the Determination of Heat Transfer Coefficients in an Airfoil Dryer. Drying Technology 3 (1985), S. 171

- [LAS96]** Lin, W.-Y., Speyer, R.F., Agarwal, G.: Effect of flame support layer geometry and materials on the radiant efficiency of gas radiant burners. *Experimental Heat Transfer* 9 (1996), S. 247
- [LaT84]** Lampinen, M.J., Toivonen, K.: Application of a Thermodynamic Theory to Determine Capillary Pressure and Other Fundamental Material Properties Affecting the Drying Process. *Drying* 84 (1984), S. 228
- [Lee74]** Lee, C.: Leistungsvergleich zwischen Schlitz- und Lochdüsen bei der Trocknung von flächigen Gütern. *Verfahrenstechnik* 8 (1974), S. 164
- [LeE93]** Letzelter, P., Eklund, D.: Coating Color Dewatering in Blade Coaters. Part 1: Mathematical Model and the Influence of Color Parameters. *Tappi Journal*, 76. (1993), S. 63
- [LeE93a]** Letzelter, P., Eklund, D.: Coating Color Dewatering in Blade Coaters. Part 2: The Influence of Machine Configuration. *Tappi Journal*, 76. (1993), S. 93
- [LeE96]** Letzelter, P., Eklund, D.: Dewatering of Coating Colors in the Film Press, Aus: *Tappi Coating Conference 1996*, S. 269
- [LeH82]** Lee, P., Hinds, J.: Analysis of Heat and Mass Transfer within a Sheet of Papermaking Fibres during Drying. *Drying '82*, Hrsg. Mujumdar, A.S., Hemisphere Publishing, S. 74
- [Leh00]** Lehtinen, E.: *Papermaking Science and Technology. Band 11: Pigment Coating and Surface Sizing of Paper. Kapitel 1: Introduction to pigment coating of paper.* Inso Corporation 1990-2000
- [Lep89]** Lepoutre, P : The Structure of Paper Coatings – an Update. *Progress in Organic Coatings* 17 (1989), S. 89
- [Let97]** Letzelter, P.: Dewatering of Coating Colors: A Filtration or Thickening Mechanism?. *Tappi Advanced Coating Fundamentals Symposium 1997*, S. 103
- [Leu00]** Leu, O.: Papier ist geduldig. *Lebendiges Rheinland-Pfalz (Zeitschrift für Wirtschaft, Wissenschaft und Kultur)*, 37 (2000), S. 11

- [LGK75]** Law, K.N., Garceau, J.J., Kokta, B.V.: Characterisation of mechanical pulp by thermal methods. *Tappi Journal* 58 (1975), S. 98
- [Luc18]** Lucas, R.: Ueber das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten. *Kolloid-Zeitschrift* 23 (1918), S. 15
- [Mäe93]** Mäenpää, T.: A Hierarchical Approach to Optimized Control of Drying of Coated Paper Helsinki University of Technology. Control Engineering Laboratory. PhD-Thesis, Report Nr. 92 (1993)
- [Mar77]** Martin, H.: Heat and Mass Transfer Rates between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces. *Advances in Heat Transfer*, 13 (1977), S. 1
- [MaS92]** Matsubayashi, H., Saito, Y.: The Influence of Coating Structure on Paper Quality. *Tappi Coating Conference* 1992, S. 161
- [MGV98]** Mital, R., Gore, J.P., Viskanta, R.: A radiation efficiency measurement procedure for gas-fired radiant burners. *Experimental Heat Transfer* 11 (1998), S. 3
- [MiM56]** Miller, E.E., Miller, R.D.: Physical Theory for Capillary Flow Phenomena. *Journal of Applied Physics* 27 (1956), S. 324
- [MTD95]** Ming, Y., Takamura, K., Davis, H. T.: Microstructure evolution in latex coatings. *Tappi Journal*. 78 (1995), S.151
- [NDS91]** Nowicki, S.C., Davis, H.T., Scriven, L.E.: Drying and Binder Migration in Coated Papers. *Tappi Coating Conference* (1991), S. 337
- [New56]** Newns, A.C.: The sorption and desorption kinetics of water in a regenerated cellulose. *Transactions of the Faraday Society* 52 (1956), S. 1533
- [NIS03]** NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69 (2003)
- [NoS90]** Nowicki, S.C., Scriven, L.E.: On the Physics of Drying and Binder Migration in Coated Papers. *Tappi Coating Conference* 1990, S. 49
- [NoS99]** Noboa, H.L., Seyed-Yagoobi, J.: A Critical Review of Drying Models for Coated Paper. *Proceedings of the*

1999 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (1999), S. 1-14; erhältlich unter: www.energysolutionscenter.org/GasIRPaper/download/DryModelPaperTexasAM799.PDF (4.4.2003)

- [Oja93]** Ojala, K.: Studies on Infrared Drying of Paper, Use of Integrating Spheres in FTIR-Measurements, and Heat and Mass Transfer Inside Paper. D.Sc. (Tech.) thesis, Helsinki University of Technology, 1993
- [OIB89]** Olsson, A.-M., Back, E.L.: On the specific heat of paper and wood products between 180-250 °C. Nordic Pulp and Paper Research Journal (1989), S. 258
- [PaK96]** Paltakari, J., Karlsson, M.A.: Determination of specific heat for dry fibre material. CPPA-82nd Annual Meeting (1996), S. B117
- [PDS95]** Pan, S.X., Davis, H.T., Scriven, L.E.: Modeling Moisture Distribution and Binder Migration in Drying Paper Coatings. Tappi Coating Conference (1995), S. 37
- [PDS96]** Pan, S.X., Davis, H.T., Scriven, L.E.: Substrate Effects on Binder Migration in Drying Porous Coatings. Tappi Coating Conference (1996), S. 115
- [PeS98]** Pettersson, M., Stenström, S.: Absorption of Infrared Radiation and the Radiation Transfer Mechanism in Paper. Part I: Theoretical Model. Journal of Pulp and Paper Science, 24 (1998), S. 349
- [PeS98a]** Pettersson, M., Stenström, S.: Absorption of Infrared Radiation and the Radiation Transfer Mechanism in Paper. Part II: Application to Infrared Dryers. Journal of Pulp and Paper Science, 24 (1998), S. 356
- [PeS00]** Pettersson, M., Stenström, S.: Electrical evaluation of electric infrared dryers. Tappi Journal 83 (2000), S.89
- [Pet99]** Pettersson, M.: Heat Transfer and Energy Efficiency in Infrared Paper Dryers. PhD-Thesis, Department of Chemical Engineering 1, Lund University, Sweden (1999)
- [Pit00]** Pitzer, J.: Vom Papyrus zum Datenträger Papier. Lebendiges Rheinland-Pfalz (Zeitschrift für Wirtschaft, Wissenschaft und Kultur), Nr. 37 (I+II) (2000), S. 1
- [Pol93]** Polat, S.: Heat and Mass Transfer in Impingement Drying. Drying Technology 11 (1993), S. 1147

- [Pra68]** Prahl, J.M.: Thermodynamics of Paper Fiber and Water mixtures. PhD Thesis, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts (1968)
- [PrW79]** Probst, K., Wohlfahrt, K.: Empirische Abschätzung effektiver Diffusionskoeffizienten in porösen Systemen. Chemie-Ingenieur-Technik 51 (1979), S. 737
- [RaC97]** Ramarao, B.V., Chatterjee, S.G.: Moisture Sorption by Paper Materials Under Varying Humidity Conditions. Fundamentals of Papermaking Materials (1997), S.703
- [RaK95]** Rajala, P.M., Karlsson, M.A.: A Drying Model for Coated Paper, for Improved Printing Properties. ASME HTD Proceedings 317 (1995), S. 445
- [Ram90]** Ramaswamy, S.: Analysis of Heat and Mass Transfer during Drying of Paper/Board under Conventional and High Intensity Conditions. PhD Thesis (1990), State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, New York
- [Rea94]** Reardon, S.A.: A mathematical model for the simulation of paper drying energy consumption. PhD-Thesis (1994), Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Tasmania
- [ReU80]** Reinbold, I., Ullrich, H.: Possibilities and limitations of high-solids coating colors. Tappi Journal, 63 (1980), S. 47
- [RhG79]** Rhodius, D., Götsching, L.: Der Trocknungsverlauf von Papier und Pappe in Abhängigkeit von Trocknungstechnischen und Papiertechnologischen Parametern. Teil IV. Das Papier 33 (1979), S. 1
- [RHR01]** Rättö, P., Hornatowska, J., Rigdahl, M.: Effect of high-temperature and soft-nip calendering on the density of paper. . Nordic Pulp and Paper Research Journal 16 (2001), S. 172
- [RiL73]** Richardson, C., Lawton, D.: The Use of Airfoils in Drying Coated Paper. Tappi Journal 56 (1973), S. 86
- [RoK90]** Rogers, J.A., Kaviany, M.: Variation of Heat and Mass Transfer Coefficients During Drying of Granular Beds. ASME Journal of Heat Transfer 112 (1990), S. 668

- [RoK92]** Rogers, J.A., Kaviany, M.: Funicular and Evaporative-Front Regimes in Convective Drying of Granular Beds. *International Journal of Mass and Heat Transfer* 35 (1992) , S. 469
- [RPP86]** Reid, R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E.: *The Properties of Gases and Liquids*, 4. ed. McGraw-Hill (1986)
- [SAC64]** Sadoh, T., Christensen, G.N.: The rate of sorption of water vapour by hemicellulose. *Australian Journal of Applied Science* 15 (1964), S. 297
- [Sal88]** Salminen, P.J., "Studies of Water Transport in Paper During Short Contact Times," Ph.D. Thesis (1988), Åbo Akademi University, Turku, Finland
- [ScB72]** Scallan, A.M., Borch, J.: An Interpretation of Paper Reflectance Based upon Morphology I: Initial Considerations. *Tappi Journal*, 55 (1972), S. 583
- [ScB74]** Scallan, A.M., Borch, J.: An Interpretation of Paper Reflectance Based upon Morphology: General Applicability. *Tappi Journal*, 57 (1974), S. 143
- [Sch38]** Schirmer, R.: Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. *VDI-Zeitschrift Verfahrenstechnik* (1938), S. 170
- [Sch65]** Schlichting, H.: *Grenzschicht-Theorie*. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1965)
- [Sch69]** Schäfer, K. [Hrsg.]: *Landolt-Börnstein. Eigenschaften der Materie in Ihren Aggregatzuständen. 5. Teil, Bandteil a. Transportphänomene I (Viskosität und Diffusion)*. Springer Verlag (1969)
- [Sch88]** Schlünder, E.U.: On the Mechanism of the Constant Drying Rate Period and its Relevance to Diffusion Controlled Catalytic Gas Phase Reaction. *Chemical Engineering Science* 43 (1988), S. 2685
- [Sch88a]** Schlünder, E.U.: Über den Mechanismus des ersten Trocknungsabschnittes und seine mögliche Bedeutung für diffusionskontrollierte katalytische Gasphasenreaktionen. *Chemie-Ingenieur-Technik* 60 (1988), S. 117
- [Sch92]** Schuster, C.: Untersuchung des Luftspalts zwischen Bahn und Walzenoberfläche im Kuehlwalzenstaender von schnelllaufenden Rollenoffsetdruckmaschinen und seine Auswirkungen auf den Wärme- und Stofftrans-

port. Dissertation, FB Maschinenbau, TH Darmstadt (1992)

- [Sch98]** Schlünder, E.U.: Analogy between heat and momentum transfer. Chemical Engineering and Processing 37 (1998), S. 103
- [SDL95]** Steffner, N. O. E., Dickson, R., LePoutre, P.: Mechanical interlocking in coated paper. Nordic Pulp Paper Research Journal 10 (1995), S.80
- [SKH70]** Schlünder, E.U., Krötzsch, P., Hennecke, F.-W.: Gesetzmäßigkeiten der Wärme- und Stoffübertragung bei der Prallströmung aus Rund- und Schlitzdüsen. Chemie-Ingenieur Technik 42 (1970), S. 333
- [SkL85]** Skowronski, J. and Lepoutre, P.: Water Paper Interaction During Paper Coating – Changes in Paper Structure. Tappi Journal 68 (1985), S. 98
- [Sko90]** Skowronski, J.: Surface Roughening of Pre-Calandered Basesheet during Drying. Journal of Pulp and Paper Science 16 (1990), S. J102
- [SLA95]** Speyer, R.F., Lin, W.-Y., Agarwal, G.: Performance evaluation of porous radiant gas burners. Experimental Heat Transfer 8 (1995), S. 73
- [SLA96]** Speyer, R.F., Lin, W.-Y., Agarwal, G.: Radiant efficiencies and performance considerations of commercially manufactured gas radiant burners. Experimental Heat Transfer 9 (1996), S. 213
- [SMD80]** Saad, N., Mujumdar, A., Douglas, W.: Heat Transfer under Multiple Turbulent Slot Jets Impinging on a Flat Plate. Drying 80, Vol. 1 (1980), S. 422
- [SNR95]** Steffner, O., Nylund, T., Rigdahl, M., "Influence of Pre-calendering on the Properties of a Coated Wood-free Paper and Coveringability of the Coating," Tappi Coating Conference (1995), S. 335
- [Spu96]** Spurk, J.H.: Strömungslehre : Einführung in die Theorie der Strömungen. 4., neubearb. Auflage, Springer (1996)
- [SRP95]** Salminen, P., Roper, J., Pollock, M.: Determining the dynamic water retention contribution of various cobinders and thickeners. Tappi Coating Conference (1995), S.277

- [SRS77]** Subba Raju, K., Schlünder, E.U.: Heat Transfer Between an Impinging Jet and a Continuously Moving Flat Surface. *Wärme- und Stoffübertragung* 10 (1977), S. 131
- [SSR00]** Seyed-Yagoobi, J., Sikirica, S. J., Ricks, M. R.: On-line pre-heating/drying of paper sheet with gas-fired infrared emitters. Tappi Papermakers Conference (2000), S. 29
- [Sta96]** Stadler, D.: Strömungsmechanik des Papierstreichens. PhD-Thesis. Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen (1996)
- [StJ95]** Stenström, S., Johansson, M.: Evaluation of the Energy Efficiencies for a Gas Heated Infrared Paper Dryer. *Drying Technology* 13 (1995), S. 1345
- [StL96]** Stanislawska, A., LePoutre, P.: Consolidation of pigmented coatings: Developments of porous structure. *Tappi Journal* 79 (1996), S. 117
- [StL96a]** Stanislawska, A., LePoutre, P.: Development of the porous structure of clay coating based on protein or latex. Tappi Coating Conference (1996), S. 89
- [TaK91]** Tao, Y.-X., Kaviany, M.: Simultaneous Heat and Mass Transfer From a Two-Dimensional, Partially Liquid-Covered Surface. *ASME Journal of Heat Transfer* 113 (1991), S. 874
- [TEC]** TECHPAP, 10 Rue de Mayencin, 38400 St MARTIN D'HERES, FRANCE, www.techpap.com/ (4.4.2003)
- [ToE95]** Toivakka, M., Eklund, D.: Prediction of Suspension Rheology through Particle Motion Simulation. Tappi Coating Fundamental Symposium (1995), S. 161
- [Toi97]** Toivakka, M.: Simulation of particle motion in pigment coating colors. D. Sc, (Tech.) Thesis, Åbo Akademi University, Turku, Finland (1997)
- [Ung88]** Unger, J.: Konvektionsströmungen. Teubner Verlag (1988)
- [VDI84]** VDI Wärmeatlas. VDI-Verlag (1984)
- [ViL82]** Videau, J.L., Lemaitre, A.: An Improved Model of Paper Machine Multicylinder Drying Section. *Drying '82*, Hemisphere Publishing (1982), S. 129

- [WaL82]** Watanabe, J. and Lepoutre, P., Journal of Applied Polymer Science 27 (1982), S. 4207
- [Wal93]** Walter, J.C. (Hrsg.): The Coating Process. TAPPI Press (1993), S. 260
- [Wea82]** Weast, R.C. (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics, 63. edition. CRC Press (1982)
- [WiH97]** Willenbacher, N., Hanciogullari, H.: Analysis of Coating Color Runnability Considering the Effect of Dewatering. Part 1: Apparent Wall Slip and Viscoelasticity at High Shear Rates, Aus: Tappi Advanced Coating Fundamentals Symposium (1997), S. 1
- [WSB00]** Wagner, W., Span, R., Bonsen, C.: Wasser und Wasserdampf. Interaktive Software zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen auf der Basis des Industriestandards IAPWS-IF97. Springer Verlag (2000)
- [XBC00]:** Xiang, Y., Bousfield, D.W., Coleman, P., Osgood, A.: The cause of backtrap mottle: chemical or physical?. Tappi Coating Conference (2000), S. 45
- [ZMO97]** Zik, O., Moses, E., Olami, Z., Webman, I.: Scaling of propagating capillary fronts. Europhysics Letters 38 (1997), S. 509
- [ZTH00]** Zhmud, B.V., Tiberg, F., Hallstensson, K.: Dynamics of Capillary Rise. Journal of Colloid and Interface Science 228 (2000), S. 263